

**RAUL MARQUES PEREIRA FRIEDMANN**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA  
DE LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMO  
EMPREGANDO ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA  
E VEÍCULO TERRESTRE NÃO TRIPULADO**

Tese apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Doutor em Ciências  
Geodésicas, no Programa de Pós-Graduação  
em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da  
Terra, Universidade Federal do Paraná,

Orientador: Prof. Dr. Luis Augusto Köenig Veiga

**Curitiba – PR  
2013**

---

F911d

Friedmann, Raul Marques Pereira

Desenvolvimento de sistema de levantamentos semi-autônomo  
empregando estação total robotizada e veículo terrestre não tripulado.  
[manuscrito] / Raul Marques Pereira Friedmann. – Curitiba, 2013.  
235f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da  
Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, 2013.

Orientador: Luis Augusto Köenig Veiga

1. Geodésia - levantamentos. 2. Geodésia - estação total robotizada. 3.  
Veículos - automação. I. Universidade Federal do Paraná. II. Veiga, Luis  
Augusto Köenig. III. Título.

CDD: 526.3

---

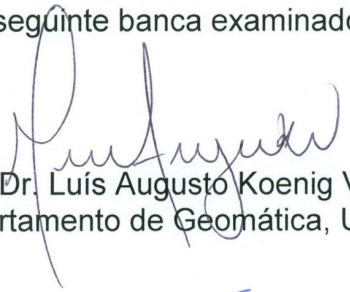
## TERMO DE APROVAÇÃO


RAUL MARQUES PEREIRA FRIEDMANN

“DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMO  
EMPREGANDO ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA E VEÍCULO TERRESTRE NÃO  
TRIPULADO”

Tese nº 88 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

  
Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga  
Departamento de Geomática, UFPR

  
Prof. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior  
Escola Politécnica Universidade de São Paulo, EPUSP

  
Prof. Dr. Hugo Vieira Neto  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR

  
Prof. Dr. João Alberto Fabro  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR

  
Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos  
Departamento de Geomática, UFPR

  
Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 25 de julho de 2013.

*Aos meus amigos*  
*Renato Serafim Gallice,*  
*Ubiradir Mendes Pinto,*  
*José Euclides Lemos Piñero*  
*László Zentai,*  
*Sergio Furtado,*  
*Adhemar da Costa Machado Filho,*  
*Luis Augusto Köenig Veiga,*  
*Elenise Hilgemberg Friedmann e*  
*ao meu filho e amigo*  
*João Pedro Hilgemberg Friedmann.*

*Que continuem a percorrer,*  
*sempre e a cada vez mais,*  
*alegres trilhas, felizes rumos.*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luis Augusto Köenig Veiga, pelo contínuo apoio, entusiasmo e colaboração ao longo de todo este trabalho e pela disposição em incentivar esta linha de pesquisa em Geodésia Aplicada.

Ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná, pelo aceite no programa e pela concessão da prorrogação quando isto se revelou necessário.

A todos os professores atuantes no PPGCG. Em especial, aos professores Carlos Nadal, Cláudia Robbi, Jorge Centeno, Luiz Danilo, Luiz Veiga, Pedro Faggion, Quintino Dalmolin e Silvio Freitas, por sugestões e apoio significativo em diversas ocasiões. Agradeço também à Verali Mônica Kleuser, secretária do programa.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Instrumentação Geodésica e, mais particulamente, ao Wander e ao Niarkios, pelo apoio em diversas atividades e levantamentos, motivo pelo qual também incluo o professor Álvaro Machado, o Marcos Passo (Margato), o João e o Nadisson.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelos arranjos necessários à minha participação no programa de doutorado na UFPR. Ao Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) e ao Departamento Acadêmico de Informática (DAINF) do Câmpus Curitiba da UTFPR, pelo apoio financeiro ao desenvolvimento do projeto, motivo pelo qual também sou grato à FUNTEF-PR.

Ao Sthephan, da Top Hobby, e ao André Botta e ao João Fabro, do DAINF, pelas valiosas e assertivas sugestões de caráter prático em servomotores e comunicação de dados.

Ao colegas professores Luis Veiga, Eduardo Borba Neves, László Zentai, Leandra Ulbricht e Jorge Centeno, pela elaboração conjunta de artigos publicados ou submetidos durante este período.

Aos meus pais, Inge e João, pelo apoio recebido em momentos oportunos.

À Elenise e ao João Pedro, pelo incentivo, paciência e compreensão ao longo de todo este trabalho.

Por fim, agradeço a Deus pelo dom da vida e pelo cuidado durante toda a jornada e de uma maneira "que excede todo entendimento".

Num momento de síntese introspectiva, Shackleton escreveu, no final de seu relato da travessia da Georgia do Sul:

Quando penso nesses dias, não tenho dúvidas de que a Providência nos conduziu, não só através daqueles campos de neve, mas também através do mar encapelado que separava a ilha Elephant do ponto onde demos em terra na Georgia do Sul. O que sei é que durante aquela longa e exaustiva caminhada de 36 horas subindo montanhas e geleiras sem nome da Georgia do Sul, muitas vezes me pareceu que éramos quatro, e não três. Não disse nada a meus companheiros a esse respeito, mas depois Worsley me disse: “Chefe, durante a marcha eu tive a curiosa sensação de que havia mais uma pessoa conosco”. E Crean admite uma sensação parecida.

Agora que estavam de volta ao mundo dos homens, aquela presença que os conduzira parecia ter desaparecido; e a garra e a coragem que os tinham levado tão longe não lhes valeriam de nada se, quando finalmente chegassem, encontrassem um homem morto que fosse na ilha Elephant.

*EDURANCE, A lendária expedição de Shackleton à Antártida.*

Caroline Alexander, Companhia das Letras.

## RESUMO

Este trabalho lida com automação topográfica e apresenta o desenvolvimento de um sistema de levantamento semi-autônomo composto por uma estação total robotizada Leica TCRA 1205 R100, um veículo terrestre não tripulado desenvolvido especialmente para esta aplicação, um prisma de reflexão total em 360° e sistemas subsidiários para medição de inclinação, comunicação de dados e controle do veículo. A área a ser levantada é delimitada por um polígono simples e a densidade do levantamento pode ser especificada por um parâmetro denominado medida da célula de referência. O controle do sistema é feito em tempo real por um programa em ambiente Matlab que, simultaneamente, monitora a posição do veículo através da estação total, comanda os seus movimentos e coleta as coordenadas dos pontos medidos. No interior da área em levantamento, o sistema procura posicionar o veículo para coletar uma série de pontos regularmente espaçados. A eficiência do sistema em realizar esta tarefa foi avaliada através de levantamentos experimentais. São apresentados os resultados e os indicadores estatísticos da qualidade do posicionamento obtido.

Palavras-chave: Geodésia. Levantamentos semi-autônomos. Estação total robotizada. Veículo terrestre não tripulado. Automação.

## **ABSTRACT**

This work deals with topographic automation and presents the development of a semi-autonomous survey system composed of a Leica TCRA 1205 R100 robotic total station, a special unmanned ground vehicle developed specifically for this application, a Leica GTZ4 360° surveying prism and subsidiary systems for tilt measurement, data communication and vehicle control. The area to be surveyed is bounded by a simple polygon. The survey linear density can be specified by the reference size cell parameter. The control system is done in real time by a Matlab script that simultaneously monitors the vehicle's position through the total station, controls its movements and collects the measured points coordinates. Within the survey area, the system seeks to position the vehicle to collect a series of evenly spaced points. The system efficiency in managing this task was evaluated by experimental surveys. Results are presented and statistical indicators of positional quality obtained.

**Keywords:** Geodesy. Semi-autonomous surveys. Robotic total station. Autonomous land vehicle. Automation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Geodímetro AGA modelo NAMS-2A .....	32
Figura 2.2 – Telurômetro .....	33
Figura 2.3 – Teodolito Kern E1 + medidor eletrônico de distâncias Kern DM503 (fabricados em 1984) .....	35
Figura 2.4 – Estações totais e prisma utilizado para pontaria .....	37
Figura 2.5 – Refletores de folhas planas e fitas reflexivas .....	40
Figura 2.6 – Retro-refletores: princípio de funcionamento e exemplos .....	41
Figura 2.7 – Prismas retro-refletores de vidro .....	41
Figura 2.8 – Trajetória dos raios no prisma refletor de vidro .....	42
Figura 2.9 – Variação da abertura efetiva em função do ângulo de incidência .....	43
Figura 2.10 – Prismas múltiplos para aumento do alcance da medição .....	44
Figura 2.11 – Prismas de reflexão em 360° .....	45
Figura 2.12 – Variação da abertura efetiva em função do ângulo de incidência nos prismas 360° .....	45
Figura 2.13 – <i>Geodimeter System 4000</i> : a primeira estação total robotizada .....	46
Figura 2.14 – Estação total robotizada com integração GNSS .....	50
Figura 2.15 – Estação total robotizada <i>Topcon Imaging Station</i> .....	53
Figura 2.16 – Relação entre os pontos da amostra e o DTM resultante .....	56
Figura 2.17 – Exemplos de polígonos simples .....	62
Figura 2.18 – Exemplos de polígonos complexos .....	62
Figura 2.19 – Polígonos convexos e polígonos côncavos .....	63
Figura 2.20 – Polígono, interior e superfície poligonal .....	64
Figura 2.21 – Exemplo de polígono vazado .....	65
Figura 2.22 – Exemplo de polígono com várias áreas vazadas .....	66
Figura 2.23 – Exemplos da decomposição de um polígono vazado em um conjunto de polígonos simples .....	67
Figura 2.24 – Exemplos do algoritmo de lançamento de raios em polígonos convexos .....	68
Figura 2.25 – Exemplos do algoritmo de lançamento de raios em polígonos côncavos .....	69

Figura 2.26 – Exemplo do algoritmo do lançamento de raios num polígono vazado .....	70
Figura 2.27 – Teste de convexidade em um polígono (resultado positivo) .....	73
Figura 2.28 – Teste de convexidade em um polígono (resultado negativo) .....	75
Figura 2.29 – Exemplos de veículos não tripulados .....	79
Figura 2.30 – Cronologia de nomes aplicados a veículos aéreos não tripulados .....	80
Figura 2.31 – Árvore genealógica dos veículos aéreos não tripulados .....	81
Figura 2.32 – Veículo aéreo não tripulado de combate (UCAV) modelo <i>Predator</i> e míssil <i>Hellfire</i> .....	82
Figura 2.33 – <i>Crusher</i> : veículo terrestre não tripulado para combate em terrenos aci- dentados .....	85
Figura 2.34 – <i>Zoe</i> : veículo terrestre não tripulado sobre rodas para exploração robóti- ca de vida no deserto do Atacama .....	86
Figura 2.35 – Robôs com estruturas <i>hexapod</i> de simetria axial e simetria radial .....	87
Figura 2.36 – Diagrama em blocos de um sistema de veículo autônomo terrestre .....	88
Figura 2.37 – Tração traseira e sistema de direção dianteira .....	92
Figura 2.38 – Geometria de Ackermann, repatenteada por Carl Benz em 1893 .....	93
Figura 2.39 – Telas ilustrativas do funcionamento de diferenciais abertos .....	94
Figura 2.40 – Triplo diferencial: a solução clássica para os veículos 4x4 .....	96
Figura 3.1 – Composição do sistema de levantamento .....	98
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do VLTC .....	99
Figura 3.3 – Gerenciamento da ETR pelo GeoCOM .....	101
Figura 3.4 – Tela inicial da ETR Leica TCR 1205 R100 .....	105
Figura 3.5 – Seqüência de telas para configuração da comunicação serial na ETR Leica TCR 1205 R100 .....	106
Figura 3.6 – Geometria básica funcional do VLTC e principais movimentos por ela proporcionados .....	112
Figura 3.7 – Fotografias do VLTC implementado / parte 1 .....	113
Figura 3.8 – Fotografias do VLTC implementado / parte 2 .....	114
Figura 3.9 – Motor de passo, polia e correia sincronizadora .....	117
Figura 3.10 – Exemplo de uma seqüência de movimentos do VLTC para execução de levantamentos em uma área de limites previamente especificados .....	119
Figura 3.11 – Exemplos de possíveis funções compostas .....	120
Figura 3.12 – Funções de posicionamento das rodas .....	121

Figura 3.13 – Movimentos em linha reta e respectivos parâmetros .....	123
Figura 3.14 – Movimentos em curva .....	127
Figura 3.15 – Relações entre as principais dimensões construtivas do VLTC e os raios de giro nas funções de movimento em curva .....	131
Figura 3.16 – Determinação dos raios de giro das rodas externas e internas e dos respectivos ângulos de giro .....	132
Figura 3.17 – Funções GIRO, GIROD( $\varphi$ ) E GIROE( $\varphi$ ) .....	138
Figura 3.18 – Geometria funcional do VLTC nas funções de giro .....	138
Figura 3.19 – Conjunto da roda, braço ajustável e servomotor de posição .....	141
Figura 3.20 – Estrutura da mensagem de comando e da mensagem de retorno .....	146
Figura 3.21 – Módulos XBEE e <i>shield</i> usados como meio de comunicação entre a UCP e a UCL .....	152
Figura 3.22 – Visão geral do fluxo das variáveis da mensagem de comando (saída) e da mensagem de retorno (entrada) .....	154
Figura 3.23 – Vista da placa <i>Arduino Uno</i> com a indicação de uso dos pinos .....	156
Figura 3.24 – Relação entre o ciclo de trabalho ( <i>duty cycle</i> – DC) e a tensão média de saída (Vmed) .....	159
Figura 3.25 – Relação típica entre a posição do servomotor, expressa em graus e a largura de pulso em microssegundos .....	161
Figura 3.26 – Aspecto do sinal PWM de controle do servomotor para as posições indicadas .....	162
Figura 3.27 – Conexões dos optoacopladores dos <i>drivers</i> de comando dos motores de passo .....	165
Figura 3.28 – Sincronização dos pulso dos motores de passo nas funções de movimento em curva .....	168
Figura 3.29 – Plataforma estática usada em testes das funções do VLTC .....	169
Figura 3.30 – Visão geral da constituição interna do acelerômetro triaxial MMA7361L .....	172
Figura 3.31 – Acelerômetro triaxial MMA7361L montado em placa .....	172
Figura 3.32 – Comportamento dinâmico e estático do acelerômetro MMA7361L .....	174
Figura 3.33 – Vínculo entre o sistema de coordenadas do acelerômetro e sistema de coordenadas do VLTC .....	175
Figura 3.34 – Haste com o prisma 360° e a estação móvel RTK .....	177



Figura 3.35 – Visão geral do Centro Politécnico da UFPR e da pista de atletismo usada como área de testes .....	177
Figura 3.36 – Exemplo de limites da área, polígono principal e retângulo envolvente .....	179
Figura 3.37 – Relação entre o sistema de coordenadas local, o retângulo envolvente e a matriz de controle e visualização do levantamento .....	182
Figura 3.38 – Resultado da função <i>inpolygon</i> aplicada aos centros geométricos das células do retângulo envolvente e ao polígono principal .....	184
Figura 4.1 – Área de testes no interior do LAIG .....	188
Figura 4.2 – Área de testes na rampa interna entre os blocos V e VI .....	194
Figura A.1 – Visão geral da área de testes usada no experimento .....	221
Figura A.2 – Estação base RTK posicionadas nos pilares .....	221
Figura A.3 – Posicionamento da ETR, pontos rastreados, orientação do sistema de coordenadas topográficas local e nomenclatura adotada para os setores ..	222
Figura A.4 – Posicionamento da estação base RTK e orientação dos eixos da projeção UTM .....	225
Figura A.5 – Obtenção dos principais segmentos de reta do levantamento ETR ..	227
Figura A.6 – Obtenção das circunferências principais do levantamento ETR .....	228
Figura A.7 – Obtenção dos principais parâmetros descritivos do levantamento ETR (a) .....	229
Figura A.8 – Obtenção dos principais parâmetros descritivos do levantamento ETR (b) .....	230
Figura A.9 – Detalhe do levantamento ETR ampliado 3 vezes .....	231

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Amostragem e coleta de dados para DTM .....	58
Quadro 3.1 – Funções de posicionamento das rodas .....	121
Quadro 3.2 – Funções de movimento em linha reta .....	122
Quadro 3.3 – Funções de movimento em curva .....	126
Quadro 3.4 – Funções de giro do VLTC .....	137
Quadro 3.5 – Relação entre os ângulos de giro para cada função de posicionamento das rodas .....	142
Quadro 3.6 – Funções de controles do sistema de direção (em alto nível) .....	147
Quadro 3.7 – Funções de controles do sistema de tração (em alto nível) .....	148
Quadro 3.8 – Indicadores de função adotados na UCP e na UCL .....	150
Quadro 3.9 – Indicadores de <i>status</i> da MCVL .....	185
Quadro 4.1 – Levantamentos realizados no LAIG / (Coordenada X) .....	190
Quadro 4.2 – Levantamentos realizados no LAIG / (Coordenada Y) .....	191
Quadro 4.3 – Levantamentos realizados no LAIG / (Coordenada Z) .....	192
Quadro 4.4 – Comparação entre os levantamentos realizados no LAIG .....	193
Quadro 4.5 – Levantamento entre os blocos V e VI / (Coordenada X) .....	198
Quadro 4.6 – Levantamento entre os blocos V e VI / (Coordenada Y) .....	199
Quadro 4.7 – Levantamento entre os blocos V e VI / (Diferença planimétrica) .....	200
Quadro 4.8 – Levantamento entre os blocos V e VI / (Inclinação) .....	201
Quadro 4.9 – Levantamento entre os blocos V e VI / (l variação de Z ao longo do eixo X em cada linha) .....	202
Quadro A.1 – Quantidade de pontos coletados .....	223
Quadro A.2 – Comparação preliminar dos parâmetros descritores da pista obtidos em cada levantamento cinemático .....	232
Quadro A.3 – Comparação final dos parâmetros descritores da pista com as reduções aplicadas ao levantamento ETR .....	233

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Observação: As siglas marcadas com asterisco (\*) são siglas empregadas neste trabalho. As demais são siglas de uso corrente em várias áreas de conhecimento ou siglas de instituições diversas.

AAA*	Acompanhamento Automático de Alvo
ACGV	<i>Autonomous Combat Ground Vehicle</i>
AGV	<i>Autonomous Ground Vehicle</i>
ALV	<i>Autonomous Land Vehicle</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASIC	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>
ATR	<i>Automatic Target Recognition</i>
AV	<i>Autonomous Vehicle</i>
CAD	<i>Computer Aided Drawing / Computer Aided Development</i>
CGV*	Centro Geométrico do Veículo
CIG*	Centro Instantâneo de Giro do veículo
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CPGCG	Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DTM	Modelo Digital do Terreno
DXF	<i>Drawing Exchange Format</i>
EDM	<i>Electronic Distance Meter</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ETR	Estação Total Robotizada
GIS	<i>Geographic Information Systems</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IUGG	<i>International Union of Geodesy and Geophysics</i>

LAIG	Laboratório de Instrumentação Geodésica
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MCR*	Medida da Célula de Referência
MCVL*	Matriz de Controle e Visualização do Levantamento
MDT	<i>Digital Terrain Model</i>
MED	Medidor Eletrônico de Distância
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
NE	<i>Northeast</i> (Nordeste)
NRC	<i>National Research Council</i>
NREC	<i>National Robotics Engineering Center</i>
NW	<i>Northwest</i> (Noroeste)
PE*	Polígono de Exclusão
PP*	Polígono Principal
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAA*	Reconhecimento Automático de Alvos
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RC	Resistivo-Capacitivo
RE*	Retângulo Envolvente
ROM	<i>Read Only Memory</i>
RTK	<i>Real Time Kinematics</i>
RTS	<i>Robotic Total Station</i>
SCL*	Sistema de Coordenadas Local
SCLE*	Sistema de Coordenadas Localmente Estabelecido
SE	<i>Southeast</i> (Sudeste)
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
SW	<i>Southwest</i> (Sudoeste)
TB	Terabyte
TUGV	<i>Tactical Unmanned Ground Vehicle</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UCAV	<i>Unmanned Combat Aerial Vehicle</i>
UCL*	Unidade de Controle Local
UCP*	Unidade de Controle Principal

UCV	<i>Unmanned Combat Vehicle</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UGV	<i>Unmanned Ground Vehicle</i>
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USA	<i>United States of America</i>
USV	<i>Unmanned Surface Vehicle;</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UTM	Universal Transversa de Mercator
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicle.</i>
UV	<i>Unmanned Vehicle</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLTC*	Veículo terrestre não tripulado para Levantamentos Topográficos Cinemáticos
VNT*	Veículo Não Tripulado
VTNT*	Veículo Terrestre Não Tripulado
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	22
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	25
1.2 HIPÓTESE DE SOLUÇÃO	26
1.3 JUSTIFICATIVA	26
1.4 OBJETIVOS	27
1.4.1 Objetivo geral	27
1.4.2 Objetivos específicos	27
1.5 CONTRIBUIÇÃO DA TESE	28
1.6 ESTRUTURA DA TESE	29
 <b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>	 31
2.1 ESTAÇÕES TOTAIS	31
2.1.1 Resumo histórico dos medidores eletrônicos de distância	31
2.1.2 Integração de MEDs a teodolitos	35
2.1.3 Desenvolvimento histórico da estação total	36
2.1.4 Alvos empregados com estações totais	39
2.1.5 Prismas retro-refletores de vidro	41
2.1.6 Estações totais robotizadas	46
2.1.7 Estações totais robotizadas integradas sistemas GNSS e com sistemas de imagem	50
2.2 MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO	53
2.2.1 Conceito de modelo e critérios de avaliação	53
2.2.2 Modelo digital do terreno	54
2.2.3 Amostragem para geração de MDTs	57
2.3 POLÍGONOS E LINHAS POLIGONAIS	58
2.3.1 Definição geométrica e descrição analítica de um polígono	59
2.3.2 Polígonos simples e polígonos complexos	61
2.3.3 Polígonos convexos e polígonos côncavos	62
2.3.4 Interior e exterior de um polígono simples	63
2.3.5 Distinção entre polígono, interior e superfície poligonal	64
2.3.6 Polígonos vazados	64

2.3.7 Algoritmo do lançamento de raios .....	67
2.3.8 Observações sobre a implementação do algoritmo do lançamento de raios .....	71
2.3.9 Testes analíticos de polígonos .....	72
2.3.9.1 Teste analítico da definição de polígono .....	72
2.3.9.2 Teste analítico da convexidade de um polígono .....	73
2.3.9.3 Teste analítico da condição de polígono simples ou complexo .....	76
2.4 VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS, VEÍCULOS AUTÔNOMOS E ROBÔS .....	77
2.4.1 Definições usadas neste trabalho .....	77
2.4.2 Alguns dados históricos sobre veículos não tripulados .....	80
2.4.3 Evolução dos VANTs no início do século XXI .....	82
2.4.4 Siglas relacionadas a veículos não tripulados .....	83
2.4.5 Veículos terrestres não tripulados .....	84
2.4.6 Composição genérica de veículos terrestres autônomos .....	88
2.5 SOBRE SISTEMAS DE TRAÇÃO E DIREÇÃO EM VEÍCULOS TERRESTRES SOBRE RODAS .....	91
2.5.1 Sobre a combinação geometria de Ackermann & diferencial traseiro .....	91
2.5.2 Sobre tração 4x4 .....	95
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>98</b>
3.1 SOBRE O CONTROLE DA ETR E SUA COMUNICAÇÃO COM A UCP .....	100
3.1.1 Sobre o protocolo GeoCOM .....	100
3.1.2 Grupos de comandos do protocolo GeoCOM .....	103
3.1.3 Controle da ETR modelo TCR 1205 R100 através do Matlab .....	105
3.2 SOBRE O VEÍCULO NÃO TRIPULADO EMPREGADO NESTE TRABALHO .....	110
3.2.1 Motivação e nomenclatura adotada .....	110
3.2.2 Geometria funcional do VLTC e movimentos decorrentes .....	111
3.2.3 Critérios adotados para o <i>design</i> do VLTC .....	115
3.2.4 Sobre o sistema de tração do VLTC .....	116
3.2.5 Sobre o sistema de direção do VLTC .....	117
3.2.6 Funções de controle do VLTC .....	118
3.2.7 Funções de posicionamento das rodas .....	120
3.2.8 Funções de movimento em linha reta .....	122

3.2.9 Sobre o controle dos motores de passo das rodas tratoras no modo movimento em linha reta .....	124
3.2.10 Funções de movimento em curva .....	126
3.2.11 Raios de giro no modo curva .....	130
3.2.12 Raio de giro mínimo no modo curva .....	134
3.2.13 Sobre o controle dos motores de passo das rodas tratoras no modo movimento em curva .....	135
3.2.14 Giro do VLTC sobre o próprio eixo .....	137
3.2.15 Implicações da função <i>GIRO</i> nas dimensões características do VLTC .....	138
3.2.16 Sobre o controle dos motores de passo das rodas tratoras no modo GIRO .....	139
3.2.17 Sobre os controles de direção .....	140
3.2.18 Correção de não-linearidade nos controles de direção .....	143
3.3 SOBRE A COMUNICAÇÃO ENTRE A UCP E A UCL .....	145
3.3.1 Estrutura geral das mensagens .....	145
3.3.2 Estrutura da mensagem de comando (UCP-UCL) .....	148
3.3.3 Estrutura da mensagem de retorno (UCL-UCP) .....	150
3.3.4 Sobre o meio de comunicação .....	152
3.4 UCL, MICROCONTROLADORES, SERVOMOTORES, MOTORES DE PASSO E SINAIS E DE CONTROLE .....	156
3.4.1 Sobre a escolha da plataforma Arduino .....	157
3.4.2 Sinais PWM de uso geral e sinais PWM aplicados a servomotores .....	159
3.4.3 Sobre os motores de passo e drivers neste trabalho .....	164
3.4.4 Sincronização dos motores de passo no modo curva .....	166
3.4.5 Plataforma estática e testes durante o desenvolvimento das funções do VLTC .....	168
3.4.6 Sobre capacidade de processamento e divisão de tarefas entre a UCP e a UCL .....	170
3.5 SISTEMA SENSOR DE INCLINAÇÃO .....	171
3.5.1 Acelerômetro triaxial MMA7361L .....	171
3.5.2 Proporcionalidade métrica ( <i>ratiometricity</i> ) .....	173
3.5.3 Comportamento estático e dinâmico do acelerômetro .....	174



3.5.4 Vínculo entre os sistemas de coordenadas do acelerômetro e do VLTC .....	175
3.6 VIABILIDADE DO USO DA ETR LEICA TCRA 1205 R100 EM LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS CINEMÁTICOS .....	176
3.7 CONTROLE DOS LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMOS .....	177
3.7.1 Definições dos limites .....	178
3.7.2 Polígono principal e retângulo envolvente .....	178
3.7.3 Medida da célula de referência e matriz de controle e visualização .....	180
3.7.4 Condição inicial da MCVL e indicadores de <i>status</i> .....	183
3.7.5 Estratégia de movimentação do VLTC .....	185
<b>4 RESULTADOS</b> .....	186
4.1 MEDIDAS DO VLTC .....	186
4.2 LEVANTAMENTOS REALIZADOS .....	187
4.2.1 Levantamentos realizados no LAIG .....	188
4.2.2 Levantamentos realizados na rampa entre os blocos V e VI .....	194
4.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS .....	203
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	206
5.1 CONCLUSÕES .....	206
5.2 RECOMENDAÇÕES .....	207
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	213

## APÊNDICE A

VIABILIDADE DO USO DA ETR LEICA TCRA 1205 R100 EM LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS CINEMÁTICOS .....	220
A.1 Descrição do experimento realizado .....	220
A.2 Levantamento topográfico cinemático com ETR .....	221
A.3 Levantamento topográfico cinemático com GPS RTK .....	224
A.4 Obtenção dos parâmetros descritores da pista .....	224
A.5 Comentários sobre as diferenças entre os levantamentos .....	234
A.6 Considerações sobre o resultado do experimento .....	235

## 1 INTRODUÇÃO

O mundo real é complexo para ser representado de forma completa. Para lidar com determinados aspectos da realidade que lhe interessam, os homens recorrem a generalizações desta realidade que lhes permitam compreender ou estudar os aspectos envolvidos.

Uma destas generalizações são os mapas topográficos, cuja função é representar a contento, dentro de certas limitações, a forma do terreno e as feições naturais e artificiais a ele associadas. Os mapas topográficos, num formato digital compatível, também constituem a informação fundamental para os Sistemas de Informações Geográficas / *Geographic Information Systems* (SIG/GIS), que referenciam diversos tipos de informação a informações de posição. Estes sistemas podem “capturar, modelar, manipular, recuperar, consultar, analisar e apresentar dados geograficamente referenciados” (CÂMARA NETO, 1995). Estes dados, conforme a situação, podem ser relativamente duradouros ou possuir uma natureza bastante dinâmica, apresentando significativas variações temporais. Quaisquer evoluções nos processos desde a captura até a apresentação dos dados contribuem para a melhoria destes sistemas – inclusive evoluções nos processos de obtenção das informações geográficas e topográficas, às quais estão vinculadas as demais informações de um SIG.

A evolução dos equipamentos, acessórios e programas voltados à coleta e processamento de dados geodésicos tem sido uma constante nos últimos anos. Equipamentos que podem ser operados por controle remoto, que localizam automaticamente a posição de prismas retrorrefletores em campo (as estações totais robotizadas) e que fazem a leitura automática de miras (os níveis digitais) são exemplos. Uma das linhas de pesquisa dentro das Ciências Geodésicas é justamente a automação dos processos de coleta e processamento, além do desenvolvimento de novas alternativas para a realização destes levantamentos.

Por automação entende-se um “sistema automático no qual os mecanismos controlam seu funcionamento, dispensando, quase por completo, a interferência do ser humano” (MICHAELIS, 2006). Na Geodésia a automação está presente em

diferentes estágios do trabalho, sendo que o grau de automação de cada um é variável. O *US ARMY CORPS OF ENGINEERS* (2002), na abordagem da automação de um sistema para a coleta de dados voltados ao monitoramento de estruturas, diz que o envolvimento humano na automação pode ser total, no caso de um sistema completamente manual, até virtualmente nenhum, num sistema completamente automatizado, sendo que nenhum destes extremos é prático. De acordo com LIMA (2005):

“Algumas das diretrizes estratégicas formuladas pelo *National Research Council* (NRC) estabelecem que novos sistemas de posicionamento preciso devem ser sempre colocados à disposição da comunidade científica geofísica e geodésica (NRC, 1995). Para que isso ocorra devem ser incentivadas pesquisas que envolvam conteúdos interdisciplinares e que utilizem desenvolvimentos tecnológicos inovadores.”

Neste contexto, Veiga (2006) pondera que "independentemente do grau de automatização, o objetivo final é comum: que a intervenção do operador seja a mínima possível – da coleta dos dados brutos até a representação final da área levantada".

Outras evidências do interesse da comunidade das Ciências Geodésicas na área de navegação de veículos autônomos e da integração de sistemas com múltiplos sensores encontram-se no âmbito da Associação Internacional de Geodésia / *International Association of Geodesy* (IAG), Comissão 4 – Posicionamento e Aplicações. Nos relatórios 2007-2009 e 2007-2011, a Sub-Comissão SC-4.1 (denominada *Multi-Sensor Systems*) elencava diversos objetivos relacionados à integração de sistemas de posicionamento, onde podem ser destacados (IAG, 2009; IAG, 2011):

- Acompanhar os avanços em sensores e algoritmos de navegação, incluindo, por exemplo, a navegação de veículos autônomos;
- Estudar e relatar o desempenho de sistemas de navegação autônomos e integrados;
- Estimular novas idéias e inovação em: algoritmos de navegação, calibração de sensores e sincronização; processamento de informações de sensores em tempo real; técnicas de automação para extração de informação a partir de sistemas com múltiplos sensores utilizando os chamados sistemas especialistas;

- Estudar e monitorar o progresso em novas aplicações (e.g., em transportes, engenharia, navegação pessoal e veicular) com múltiplos sensores.

A execução de diversos tipos de levantamentos topográficos ou de informações específicas do terreno necessita a ocupação física das posições envolvidas, mas existem situações em que tais levantamentos não deveriam ser realizados com a presença de operadores humanos no ambiente em trabalho. Áreas contaminadas por determinados agentes químicos ou com a presença de explosivos não deflagrados constituem exemplos deste tipo de situação.

Embora parte dos levantamentos topográficos necessários à descrição destas áreas possa ser feita à distância por processos fotogramétricos, de sensoriamento remoto ou de sistemas *laser scanner* aerotransportados ou terrestres, tais sistemas usualmente não operam em tempo real. Além disto, eles não podem coletar informações do terreno que exijam a ocupação física dos locais envolvidos. Em tais cenários o uso de um veículo terrestre não tripulado (VTNT) com capacidade de atuar no levantamento topográfico e, por meio de sensores de uso específico, coletar as informações do terreno que exijam a ocupação física, constitui uma opção adequada para obtenção destas informações. Um VTNT com estas capacidades pode tanto realizar levantamentos topográficos em tempo real quanto viabilizar um SIG destinado a um propósito específico. A operação em tempo real é um recurso que pode ser útil, por exemplo, em processos de busca ou de coletas de amostras em futuras aplicações que venham a fazer uso do veículo.

O emprego de um VTNT dedicado e controlado remota e continuamente por um operador humano já seria uma opção para lidar com os perigos inerentes a estes ambientes e os riscos associados a tais condições de trabalho. Porém, um VTNT capaz de realizar estes levantamentos de forma semi-autônoma constitui uma opção mais interessante e que pode automatizar parte das tarefas envolvidas. O presente trabalho aborda especificamente esta questão.

A captura de determinados tipos de informação associadas ao terreno pode ser feita *in loco* por um VTNT portando um correspondente sensor de uso específico. Se, simultaneamente, este veículo puder determinar sua própria posição de forma

tridimensional, abre-se a possibilidade de executar o mapeamento topográfico de uma área de interesse e, também, de mapear simultaneamente a desejada informação específica associada ao terreno.

Quanto ao posicionamento do VTNT, uma possibilidade seria prover o veículo com um sistema GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) operando no modo cinemático em tempo real (*Real Time Kinematics* – RTK), embora esta solução dependa, em parte, da ausência de obstruções e de efeitos de multicaminhamento que possam comprometer a qualidade do posicionamento. Os veículos aéreos não tripulados e os aquáticos de superfície exploram amplamente o posicionamento por sistemas GNSS RTK devido à ausência de obstruções na maioria das situações de interesse prático, mas os efeitos de multicaminhamento continuam presentes nos veículos aquáticos de superfície e sua possível influência em cada aplicação deve ser devidamente considerada e tratada.

Outra solução seria prover o VTNT de um prisma de reflexão total em 360° e obter sua posição com o auxílio de uma estação total robotizada (ETR). Esta solução está, a princípio, limitada a situações onde seja possível manter a visada direta da estação para o prisma, mas o emprego de técnicas de navegação estimada (*dead reckoning*) poderia, dentro de certas limitações, prover posicionamento durante as interrupções de visada.

O presente trabalho tem por objeto de pesquisa a realização de levantamentos topográficos do terreno de forma semi-autônoma usando um sistema composto basicamente de um VTNT dedicado transportando um prisma de reflexão total em 360°, uma estação total robotizada e subsistemas auxiliares para comunicação e controle do veículo.

## 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Como realizar o levantamento topográfico de uma área previamente delimitada priorizando a componente altimétrica (coordenada Z) de forma autônoma, sem a necessidade da interferência de um operador?

## 1.2 HIPÓTESE DE SOLUÇÃO

Através do desenvolvimento de um sistema baseado em um veículo terrestre não tripulado dedicado, um conjunto de sensores de posicionamento, programas e algoritmos, é possível desenvolver um sistema automatizado para a execução de um levantamento topográfico de uma área de forma semi-autônoma (ênfatizando a componente altimétrica) e minimizar a interferência humana no processo.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Vários processos de levantamentos topográficos necessitam a presença física nas posições envolvidas e em determinadas situações, quando há necessidade de coletar informações diretamente associadas ao terreno, a ocupação física torna-se indispensável. Neste contexto, um veículo capaz de automatizar determinadas tarefas envolvidas pode contribuir – ao menos parcialmente – para a melhoria de um processo.

Contudo, existem situações em que, por questões de segurança, tais levantamentos não deveriam ser realizados com a presença de operadores humanos. Por exemplo, riscos como o de desmoronamento, de explosão, a presença (ou suspeita) de animais hostis ou peçonhentos, agentes contaminantes e outros fatores podem favorecer ou demandar o emprego de VTNTs a fim de permitir a realização dos levantamentos pretendidos sem a presença de um atuador humano na área considerada.

A recente disponibilidade de estações totais robotizadas providas de recursos como o reconhecimento automático de alvos permitiu, por exemplo, acelerar a localização de alvos. Por tornar o levantamento menos dependente da acuidade visual e da habilidade do operador, também permitiu melhorias na exatidão dos levantamentos. Como exemplo de aplicações mais especializadas pode-se mencionar o monitoramento de estruturas, onde o uso deste tipo de estação permite que seqüências de alvos solidários a uma estrutura sejam localizadas com maior rapidez

e comparadas com os respectivos registros anteriores – procedimentos que facilitam o monitoramento das respectivas deformações.

O Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) possui, em âmbito nacional, extensa tradição de pesquisa em instrumentação geodésica, em suas aplicações específicas e no estudo de possíveis aplicações em levantamentos. Inclusive, um dos grupos de pesquisa chefiado por professores do PPGCG integrantes da linha de pesquisa em levantamentos é o grupo de Geodésia Aplicada a Engenharia. Contudo, há uma lacuna na pesquisa de levantamentos topográficos em tempo real e, até o presente momento, não foram desenvolvidos trabalhos envolvendo VTNTs ou levantamentos topográficos executados de forma autônoma ou semi-autônoma.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

Realizar o levantamento topográfico cinemático de uma área previamente delimitada, de forma semi-autônoma e com um sistema desenvolvido especificamente para esta tarefa e composto por uma estação total robotizada (ETR), um VTNT, um prisma de reflexão total em 360° e sistemas subsidiários.

### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Construir um VTNT dedicado a levantamentos topográficos cinemáticos de superfícies e provê-lo dos equipamentos e instrumentos necessários à execução dos levantamentos pretendidos e à comunicação com a estação total robotizada.
2. Desenvolver uma metodologia para mapeamento topográfico autônomo ou semi-autônomo.

3. Usar o VTNT desenvolvido para realizar o levantamento de uma área de teste compatível com suas capacidades de movimentação e testar a eficiência do levantamento resultante.
4. Utilizar processos de modelagem digital do terreno para comparar o levantamento semi-autônomo realizado pelo sistema desenvolvido com levantamentos topográficos de referência realizados com uma estação total e com um sistema *laser scanner* terrestre.

## 1.5 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

1. Desenvolvimento de um método para realizar um levantamento semi-autônomo numa área de limites pré-estabelecidos por linhas poligonais fechadas. O método é baseado numa estratégia de varredura capaz de amostrar pontos em quantidade compatível com a densidade de pontos especificada e, além disto, prevê recursos para a detetar situações onde a variação do relevo justifique a coleta de pontos adicionais para geração de um modelo digital de terreno adequado.
2. Desenvolvimento de um veículo não tripulado com geometria funcional adequada à realização de levantamentos topográficos cinemáticos e controlado a partir de funções de alto nível em ambiente Matlab. A definição das funções enfatiza a capacidade preditiva dos movimentos a realizar e, por consequência, a habilidade em ocupar determinadas posições durante o processo de levantamento.
3. Desenvolvimento de uma mensagem de comando e de uma mensagem de retorno padronizadas mas suficientemente versáteis para, via Matlab, (1) controlar os movimentos do veículo e (2) monitorar seu comportamento no terreno. A estrutura das mensagens contém diversas reservas técnicas e é suficientemente versátil para incluir parâmetros adicionais de controle do veículo, de possíveis dispositivos agregados, para retornar informações de



diversos tipos de sensores analógicos e digitais e também informações para controle de fluxo do processo de levantamento.

A escolha do Matlab para o gerenciamento das tarefas facilita futuras aplicações da plataforma desenvolvida porque este programa é amplamente usado pela comunidade de Ciências Geodésicas em diversas aplicações. O controle de estações totais robotizadas via Matlab, a geometria funcional do veículo, suas funções de comando e os recursos previstos na estrutura da mensagem também são elementos facilitadores de outros trabalhos que venham a fazer uso desta plataforma ou de parte das soluções empregadas.

## 1.6 ESTRUTURA DA TESE

O primeiro capítulo do trabalho apresenta a introdução, descreve o problema, a hipótese de solução e sua justificativa. Também estão apresentados o objetivo geral, os objetivos específicos, a contribuição da tese e a presente descrição de sua estrutura.

O segundo capítulo, Revisão de Literatura, contempla os principais assuntos envolvidos no trabalho e os organiza em 5 seções. A estação total robotizada e o prisma de reflexão total em 360° formam a base do sistema de posicionamento e são explorados na primeira. Seguem-se duas outras relacionadas à modelagem digital do terreno, polígonos e linhas poligonais – temas que pela sua envergadura, diversidade de tratamento e possibilidades de aplicação nas Ciências Geodésicas requerem equilíbrio entre seus fundamentos, a aplicação pretendida e sua forma de realização. A quarta seção apresenta um panorama geral dos veículos não tripulados, algumas considerações sobre robótica e aborda a composição genérica de veículos terrestres autônomos. A quinta e última dá atenção aos fundamentos e a alguns aspectos dos sistemas de tração e de direção de veículos automotores porque um entendimento básico dos mesmos é indispensável a qualquer decisão relacionada ao uso de veículos terrestres autônomos – seja na adaptação de uma plataforma já existente ou na opção por desenvolver outra dedicada a uma missão

específica. A natureza multidisciplinar do trabalho justifica a inclusão desta última seção.

O terceiro capítulo, Metodologia, detalha a composição do sistema, o controle da ETR, o VTNT desenvolvido (geometria funcional, possíveis movimentos, seu modelamento matemático e correspondentes funções de alto nível), os diversos subsistemas e a comunicação entre eles. Ela também relata experiências realizadas no início do trabalho para testar a viabilidade de emprego da ETR como sistema de posicionamento, os levantamentos de referênciia realizados e se encerra com a realização do levantamento automatizado.

O quarto capítulo apresenta o resultado do levantamento semi-autônomo realizado com o sistema na área de testes e sua comparação com os levantamentos de referência.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e recomendações decorrentes do trabalho realizado.

Ao final de trabalho encontram-se as referências, ordenadas alfabeticamente.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ESTAÇÕES TOTAIS

As estações totais constituem uma categoria de instrumentos resultante da fusão dos teodolitos com os medidores eletrônicos de distância. Atualmente, a estação total é o mais prático e popular tipo de instrumento usado nos levantamentos topográficos com sistemas de coordenadas localmente estabelecidos (SCLEs) e isto decorre tanto da pronta disponibilidade das medidas efetivamente realizadas (distância inclinada, direção horizontal e direção vertical) quanto dos dados resultantes (distância horizontal, desnível vertical, ângulos horizontais, ângulos verticais, coordenadas do alvo expressas no SCLE etc). Posteriormente, a robotização das estações totais e os recursos de integração com sistemas GNSS e sistemas de imagem acrescentaram significativos recursos aos modelos de estação destinados a propósitos específicos.

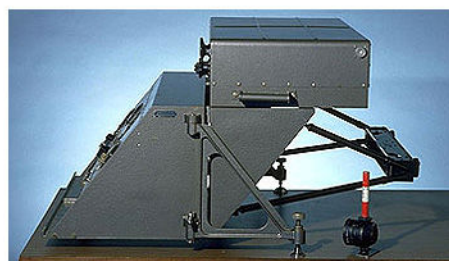
#### 2.1.1 Resumo histórico dos medidores eletrônicos de distância

Em Geodésia e em Topografia, historicamente a medição eletrônica de distâncias entre dois pontos estáticos evoluiu a partir de técnicas usadas para a determinação da velocidade da luz (RÜEGER, 1989).

Tipicamente a medição eletrônica de distâncias é baseada (a) no tempo de propagação de uma onda eletromagnética portadora devidamente modulada emitida por uma fonte posicionada sobre o primeiro ponto e refletida por um dispositivo posicionado sobre o segundo ponto e (b) na diferença de fase entre o sinal modulante da onda transmitida e o sinal modulante recuperado da onda refletida. De modo geral, pode-se afirmar que o tempo de propagação fornece a parcela mais significativa da medida de distância e que a diferença de fase permite um refinamento da mesma medida. A onda portadora pode ser radiação eletromagnética na faixa do espectro visível, microondas, infravermelho ou laser.

De acordo com Zetsche (1979)<sup>1</sup>, citado por Rüeger (1989), o primeiro medidor de distância eletro-óptico foi desenvolvido por Lebedew, Balakoff e Wafiadi, no Instituto Óptico da URSS, em 1936.

Outros autores (WENNSTROÖM, 2008; STURMAN & WRIGHT, 2008) citam como primeiro medidor eletrônico de distância / *eletronic distance meter* (MED/EDM) o modelo experimental do geodímetro (*geodimeter* / ***geodetic distance meter***), desenvolvido na Suécia por Erik Bernstrand, que empregava luz visível como onda portadora e um espelho como dispositivo refletor (figura 2.1). As primeiras medições experimentais com este geodímetro foram realizadas em 1947 e em 1948 o modelo experimental deste medidor de distâncias foi apresentado na conferência da *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) e da *International Association of Geodesy* (IAG) realizada em Oslo.



Unidade de medida (Comprimento 880 mm, Largura 430 mm, Altura 350 mm)



Unidade óptica (Comprimento 870 mm, Largura 460 mm, Altura 530 mm)

FIGURA 2.1 – GEODÍMETRO AGA MODELO NAMS-2A  
FONTE: UNSW SURVEYING INSTRUMENT COLLECTION (2000)

NOTA: Disponível em [http://www.gmat.unsw.edu.au/currentstudents/ug/projects/f\\_pall/html/e11.html](http://www.gmat.unsw.edu.au/currentstudents/ug/projects/f_pall/html/e11.html)

Em 1950 a companhia sueca AGA disponibilizou o primeiro instrumento comercial, o geodímetro NASM-2, sendo que as 10 primeiras unidades foram usadas nos Estados Unidos, Dinamarca, Reino Unido, Austrália e Suécia. Uma limitação de uso deste instrumento, e também de alguns dos modelos posteriores de

<sup>1</sup> ZETSCHE, H. **Electronische Entfernungsmessung (EDM)**. Stuttgart: Wittwer, 1979.

geodímetros, era o fato de que medições de distâncias mais longas somente poderiam ser feitas durante o período noturno, quando a influência da iluminação natural dos ambientes deixava de ser significativa.

Outro modelo experimental de medidor eletrônico de distância foi o telurômetro (*tellurometer*), que empregava microondas como portadora e foi desenvolvido em 1954/1955 por Trevor Wadley, do *Council for Scientific and Industrial Research* da África do Sul, a fim de atender uma demanda específica do *South African Department of Trigonometrical Survey* (STURMAN; WRIGHT, 2008). O uso de microondas eliminou a interferência da luz ambiente no processo de medição do telurômetro e acabou com as restrições de uso diurno, acrescentando uma significativa vantagem operacional (figura 2.2).

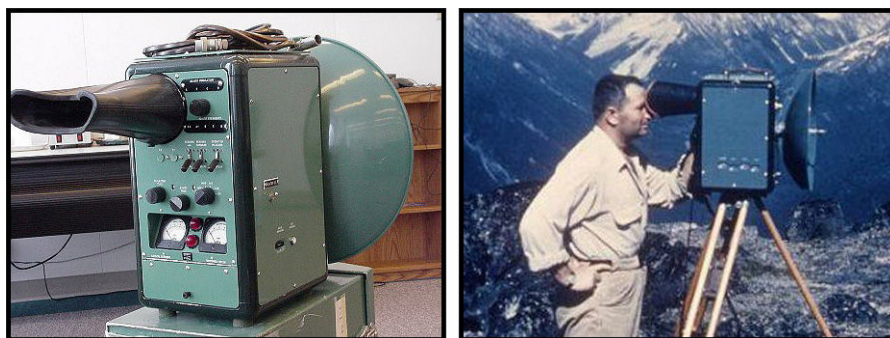


FIGURA 2.2 – TELURÔMETRO  
FONTES: NOAA (2007) & NRCAN (2009)

Disponível em: <[http://celebrating200years.noaa.gov/distance\\_tools/tellurometermra1.html](http://celebrating200years.noaa.gov/distance_tools/tellurometermra1.html)> e <<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/spatial-referencing/geodetic-timeline/5560>>. Consulta em: 18-abr-2013.

À semelhança do geodímetro, o modelo experimental do telurômetro deu sequência a outros modelos mais adequados a trabalhos de campo e que foram extensivamente empregados por diversas organizações responsáveis por sistemas geodésicos de referência (SGRs) de âmbito nacional, internacional ou global.

Rüegüer (1989) apresenta informações similares em relação ao telurômetro, mas menciona que o uso de ondas de rádio refletidas para a medição de distâncias havia sido sugerida por Tesla já em 1889 e que uma primeira patente para um medidor eletromagnético de distância foi feita por Löwy, em 1923. Zetsche (1979), novamente citado por Rüeger (1989), menciona que o primeiro medidor de distância

por ondas de rádio (baseado no princípio da interferência) foi desenvolvido por Schegolew, Boruschko e Viller em 1926, em Leningrado.

Em relação aos procedimentos de uso do geodímetro e do telurômetro, o *National Resources Canada* apresenta o seguinte comentário (NRCAN, 2009):

Nem os Geodímetros nem os Telurômetros eram sistemas fáceis de usar, auto-suficientes ou de apertar botões. Audaciosos topógrafos do C&GS [Coast and Geodetic Survey] eram necessários para instalar o equipamento, centrá-lo sobre os marcos, efetuar as leituras de temperatura e os ajustes, e assim por diante. Além disto, era necessário um tempo de aquecimento, particularmente antes que os transistores substituíssem as válvulas; chaves e frequências tinham de ser configurados corretamente; e procedimentos e leituras finas tinham de ser tomados. Telurômetros operavam nos modos "mestre" e "remoto" e requeriam o uso de um sistema telefônico embutido para coordenar os trabalhos. Contudo, os instrumentos de medição eletrônica de distância eram uma grande melhoria em relação ao uso de incômodas trenas para a medição de distâncias.

A partir da década de 1960, o surgimento e o contínuo desenvolvimento da tecnologia laser (LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) permitiu seu emprego nos sistemas de medição eletrônica de distância. O fato da tecnologia laser viabilizar a obtenção de fontes de radiação eletromagnética coerentes – mesmo comprimento de onda, fase e polarização – e fortemente colimadas (ou, posto de outra forma, com baixa divergência) permitiu o desenvolvimento de medidores eletrônicos de distância com precisão e exatidão bastante superiores às proporcionadas pelas tecnologias até então existentes. Porém, por questões de custo e operacionais, o uso desta nova geração de MEDs ainda aconteceu quase que exclusivamente em ambientes de pesquisa ou com usuários, organizações e tarefas altamente especializadas.

Poder (1977) comenta que em meados da década de 1970 a estabilidade dos instrumentos eletrônicos usados na medição de distância em levantamentos de primeira ordem, envolvendo visadas de dezenas de quilômetros, era uma questão já bem resolvida pela disponibilidade – na época – de lasers, melhor óptica e instrumentos de microondas e cita que “A situação da refração [atmosférica] era mais ou menos o problema dominante, os erros instrumentais não eram muito

significativos como questão de fato... E assim, o que focamos [neste simpósio] foi mais ou menos a refração.”

### 2.1.2 Integração de MEDs a teodolitos

Durante as décadas de 1970 e 1980, a progressiva miniaturização de dispositivos eletrônicos e o desenvolvimento massivo de circuitos integrados de alta densidade (inclusive os microprocessadores e outros tipos de circuitos dedicados) reduziram gradualmente o tamanho e o custo dos sistemas medidores eletrônicos de distância. Isto resultou em progressivos aperfeiçoamentos nos medidores usados em levantamentos geodésicos, mas também resultou em MEDs suficientemente portáteis para uso em levantamentos topográficos. Entre os profissionais de Topografia, a facilidade em medir a distância entre posições intervisíveis no terreno de forma praticamente imediata e independente das condições do meio entre elas era um fator de incentivo ao uso de MEDs portáteis – que, claro, contribuíam para tornar o trabalho de campo mais produtivo e menos desconfortável.

Um significativo avanço – qualitativo, conceitual e de *design* – aconteceu com o lançamento de MEDs que podiam ser associados a algum modelo de teodolito dos fabricantes de maior tradição (figura 2.3).



FIGURA 2.3 – TEODOLITO KERN E1 + MEDIDOR ELETRÔNICO DE DISTÂNCIAS KERN DM503 (FABRICADOS EM 1984)

FONTE: HILSTER (2010)

NOTA: Disponível em: <<http://www.dehilster.info/instrumenten/totalstation1/index.html>>. Consulta em: outubro de 2010.

A partir de então, a medição de direções, ângulos horizontais e ângulos verticais (teodolito) e de distâncias (MED) poderia ser realizada com um único equipamento. Usualmente o arranjo tornava os eixos da luneta e do MED paralelos e fixava a distância entre eles no plano vertical. Por exemplo, na figura 2.3 encontram-se fotografias do distanciômetro KERN DM503, que podia ser acoplado ao teodolito eletrônico E1, do mesmo fabricante.

Este tipo de arranjo facilitava a execução dos levantamentos topográficos, mas apresentava um erro sistemático característico: o afastamento entre o eixo do MED e a linha de visada associada à luneta do teodolito (e, portanto, à correspondente direção horizontal e ao correspondente ângulo vertical) não coincidia com a linha associada à medição de distância, mesmo que lhe fosse muito próxima. Por consequência, era então necessário corrigir a distância medida eletronicamente. Obviamente as correções eram mais significativas em distâncias curtas, decresciam com o aumento da distância medida e a partir de um determinado valor se tornavam praticamente desprezíveis.

### 2.1.3 Desenvolvimento histórico da estação total

A incorporação do MED ao teodolito num arranjo óptico coaxial – no qual a medição da distância inclinada fosse realizada diretamente sobre a linha de visada da luneta – passou a ser uma questão de tempo e um objetivo da maioria dos fabricantes deste tipo de equipamento.

E, de fato, quando este objetivo foi atingido de forma satisfatória, um novo paradigma e um novo tipo de instrumento foram efetivamente estabelecidos em Topografia e em Geodésia: as *estações totais* (em inglês, *total stations*) – um neologismo técnico para descrever instrumentos capazes de medir direta e simultaneamente, numa única visada, a distância inclinada, a direção horizontal e o ângulo vertical associados a um ponto visado, sobre o qual era posicionado um dispositivo refletor dedicado e que passou a ser chamado genericamente de prisma refletor (em inglês, *prism*) ou, de forma ainda mais abreviada, prisma. A função básica deste prisma é tanto refletir os sinais enviados pelo MED da estação total quanto servir de



alvo para a pontaria. A figura 2.4 ilustra modelos de estação total de tradicionais fabricantes de instrumentos topográficos e também um modelo de prisma.



FIGURA 2.4 – ESTAÇÕES TOTAIS E PRISMA UTILIZADO PARA PONTARIA  
FONTE: TOPCON (2010), NIKON (2010), SOKKIA (2010)

Em resumo, apesar do uso de medidores eletrônicos de distância (MEDs) datar do fim da década de 1940 (ou, segundo Zetsche (1979), de meados da década de 1920), durante as quatro décadas seguintes o seu emprego esteve restrito a ambientes de pesquisa ou usuários altamente especializados. Foi na década de 1980 que seu uso começou a se popularizar entre os profissionais de topografia, quando os MEDs foram combinados com os teodolitos eletrônicos de então, e, na sequência dos aperfeiçoamentos, resultaram no que veio a ser chamado de estação total. O tipo de instrumento resultante desta fusão tornou mais simples e ágeis os levantamentos de campo baseados em medidas de distâncias e de ângulos – irradiação, poligonação, triangulação e trilateração.

Além de facilitar o processo de medição, os sistemas eletrônicos embutidos passaram a incorporar tarefas até então realizadas posteriormente. Por exemplo, o cálculo da distância horizontal e do desnível vertical associados à visada entre dois pontos – e que podem ser obtidos de forma imediata a partir de medidas efetuadas

com a estação— são recursos comuns mesmo nos modelos mais antigos de estação total<sup>2</sup>. Já o cálculo de uma direção e das coordenadas de um ponto visado são procedimentos que exigem o posicionamento e a orientação da estação total num sistema de coordenadas conhecido (mesmo que localmente estabelecido), mas também são exemplos de recursos incorporados a praticamente todos os modelos de estação total, mesmo os mais simples.

Em poucos anos este tipo de instrumento estabeleceu um novo paradigma na topografia. Wolf (2003) comenta que “A estação total é provavelmente o mais popular e o mais importante instrumento atualmente empregado nos levantamentos topográficos modernos, tendo praticamente substituído todos os trânsitos, teodolitos e medidores eletrônicos de distância isolados.” As conveniências de medir simultaneamente a direção horizontal, o ângulo vertical e a distância inclinada (e, portanto, de calcular a distância horizontal e o desnível vertical numa única operação), associada às capacidades de informar em tempo real as coordenadas do ponto visado num sistema topográfico localmente estabelecido e de armazenar os dados na forma de “cadernetas de campo eletrônicas” contribuíram para tornar o processo de levantamento mais produtivo.

Processos posteriores de manipulação dos arquivos originais gerados pelas estações totais durante os levantamentos de campo permitem, por exemplo, gerar novos arquivos em formato DXF (*Drawing Exchange File format*), que são diretamente utilizáveis por softwares tipo CAD. Este recurso facilita o uso posterior das informações e é particularmente adequado à realização de levantamentos do tipo *as built*. Em alguns modelos de estação total a facilidade está diretamente incorporada ao equipamento e dispensa o uso de um software intermediário.

---

<sup>2</sup> As informações de altura do instrumento e altura do alvo, necessárias aos cálculos e que se tipicamente se repetem para uma grande quantidade de pontos, são usualmente inseridas manualmente em menus de configuração do equipamento.

O posterior desenvolvimento de estações totais capazes de medir distância para o ponto visado sem o uso de prisma<sup>3</sup> foi outro fato marcante e, durante a década de 1990, o surgimento de estações totais providas de servomecanismos, controles remotos e sistemas de radiocomunicação embutidos caracterizou o que passou a ser chamado genericamente de *estação total robotizada / robotic total station* (ETR/RTS). Isto viabilizou novas aplicações para as estações totais e será abordado mais adiante nesta revisão. Antes disto convém tratar dos diversos tipos de alvo empregados em levantamentos com estações totais.

#### 2.1.4 Alvos empregados com estações totais

O MED de uma estação total necessita de um nível mínimo de intensidade do sinal refletido para que seja possível sua efetiva detecção. Além disto, a qualidade deste sinal refletido também é importante para o processamento das informações que permitem a medição de distância.

Para garantir medições adequadas de distância, a maioria das estações totais emprega alvos especiais. Rüeger (1989) e Martini (2005) citam como principais exemplos os prismas refletores de vidro, os retrorrefletores de acrílico e folhas e fitas reflexivas.

O prisma refletor de vidro (usualmente chamado apenas de prisma) é o mais eficiente destes dispositivos, mas seu custo é significativo – por exemplo, em 2010, de 5 a 20% do preço de uma estação total de uso geral. Apesar de seu custo relativamente alto, o prisma é o alvo mais comumente usado devido ao grau de exatidão e às facilidades que pode proporcionar.

Folhas e fitas reflexivas usadas em sinalização automotiva são basicamente alvos planos formados por milhares de microlentes esféricas agregadas a uma

---

<sup>3</sup> Isto se tornou possível tanto pela disponibilidade de fontes de laser compactas e de maior potência (o que, para um mesmo tipo alvo, permite sinais refletidos proporcionalmente maiores) quanto pela disponibilidade de detectores mais sensíveis.

resina e recobertas por um filme plástico transparente (MARTINI, 2005). Na esquerda da figura 2.5 há exemplos de alvos autoadesivos com diferentes tamanhos e no centro há um alvo especial dupla face e de constante zero<sup>4</sup>. Na direita uma fita autoadesiva destinada à sinalização automotiva e que, sob certas condições, pode servir como alvo para o monitoramento de estruturas.



FIGURA 2.5 – REFLETORES DE FOLHAS PLANAS E FITAS REFLEXIVAS  
 FONTE: LEICA GEOSYSTEMS (2010) & 3M DO BRASIL (2010)

Segundo Rüeger (1989) os retro-refletores de acrílico são tipicamente dispositivos formados por arranjos regulares de pequenos cantos de cubo com diâmetro típico de 2mm e dispostos de forma a refletir a luz incidente em uma direção paralela à direção de incidência. Os exemplos mais comuns deste tipo de dispositivo são os retrorrefletores empregados em diversos dispositivos de sinalização viária vertical e também nos tachões usados para o delineamento de rodovias e denominados popularmente de “olho-de-gato” e ilustrados na figura 2.6.

<sup>4</sup> Valor de distância característico do alvo que, adicionado à distância medida pela ETR, resulta na medida real de centro a centro (ETR-alvo). Tanto quanto possível, os fabricantes de equipamentos para Topografia e Geodésia procuram desenvolver sistemas (estação total + refletor) que possuam constante zero, para que nenhuma correção das distâncias medidas seja necessária.



FIGURA 2.6 RETRO-REFLETORES: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E EXEMPLOS  
 FONTES: STATEMASTER.COM, NOTICIASAUTOMOTIVAS.COM,BR, BLOG DIRIGINDO SEGURO  
 NOTA: Imagens disponíveis em < [http://www.statemaster.com/encyclopedia/Reflection-\(physics\)](http://www.statemaster.com/encyclopedia/Reflection-(physics))>, <[www.noticiasautomotivas.com.br](http://www.noticiasautomotivas.com.br)>, <[www.dirigindoseguro.com.br](http://www.dirigindoseguro.com.br)> (postagem de 3-12-2009).  
 Consulta em: outubro de 2010.

### 2.1.5 Prismas retro-refletores de vidro

Os prismas são os alvos mais comumente usados em trabalhos com estações totais ou outros medidores eletrônicos de distância. Na prática são chamados abreviada e genericamente de prismas, significando prisma refletor de vidro ou prisma retro-refletor de vidro<sup>5</sup>. Diversos modelos são mostrados na figura 2.7.



FIGURA 2.7 PRISMAS RETRO-REFLETORES DE VIDRO  
 FONTE: LEICA GEOSYSTEMS (2010)

<sup>5</sup> No caso o uso da palavra prisma para este tipo de alvo decorre do uso da palavra em Física, onde ela é usada genericamente para designar diversos elementos ópticos transparentes com superfícies retas e polidas e que, dependendo da situação, podem ser usados tanto para refratar quanto para refletir a luz. No sentido estritamente geométrico da palavras este tipo de alvo não seria um prisma, mas sim uma pirâmide triangular formada por um canto de cubo cortado por um plano perpendicular à respectiva diagonal principal (cujo resultado é uma pirâmide regular onde a base é um triângulo equilátero e cada uma das três faces é um triângulo retângulo e isóceles).

Na determinação de posição com uma estação total a função do prisma é tanto servir como elemento de pontaria como prover uma retro-reflexão elevada dos sinais emitidos pelo MED, cuja trajetória típica pode ser observada na figura 2.8.

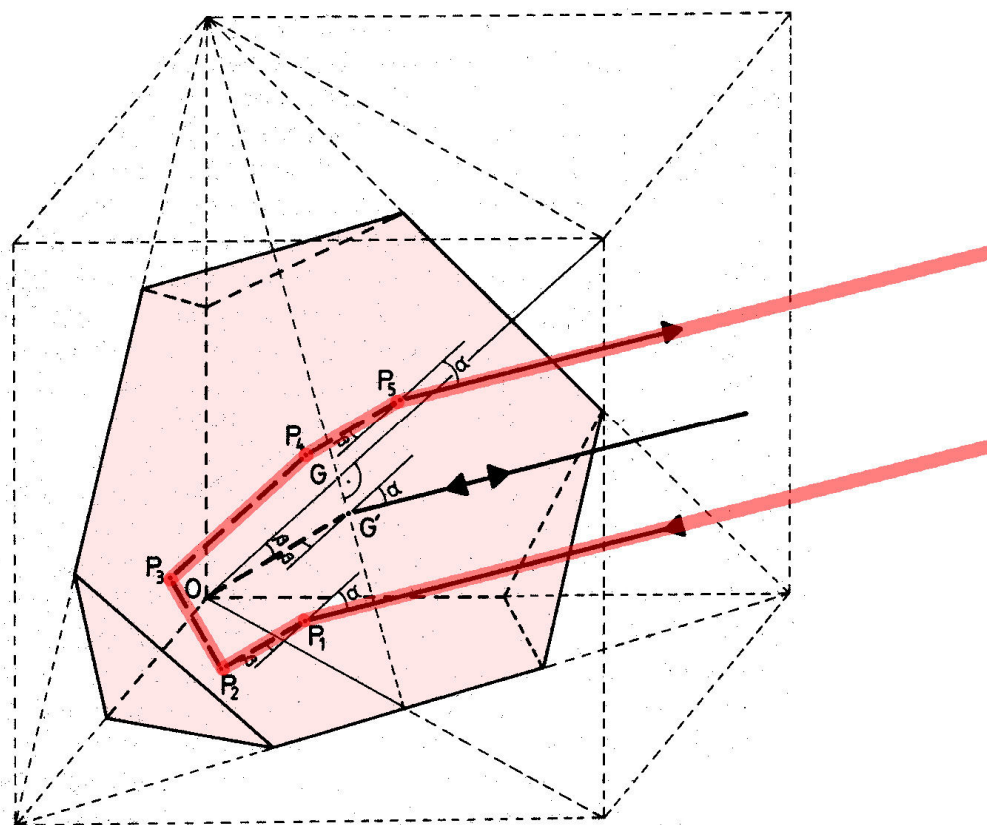


FIGURA 2.8 – TRAJETÓRIA DOS RAIOS NO PRISMA REFLETOR DE VIDRO

FONTE: Modificado pelo autor (2013) para ênfase na trajetória dos raios.

NOTA: Imagem original: RÜEGER (1989)

Sobre a geometria característica do prisma, seu alinhamento, Rüeger (1989) coloca que:

O prisma refletor de vidro consiste de um canto de um cubo cortado por um plano perpendicular à sua diagonal principal. É possível demonstrar que se os ângulos entre as faces do cubo são de exatamente  $90^\circ$ , todos os raios incidentes são refletidos de maneira tal que todos os raios incidentes e emergentes são exatamente paralelos e simétricos ao raio central (raio para o canto do prisma), independentemente do alinhamento do refletor. A trajetória dos raios no interior do prisma é ilustrada na FIGURA 2.8. A figura mostra claramente que todos os raios são refratados duas vezes na superfície frontal do prisma e refletidos três vezes internamente nas faces perpendiculares do prisma.

O alinhamento do prisma tem um efeito na abertura efetiva do refletor e conseqüentemente na potência radiante retro-refletida. A figura 2.9 mostra como a abertura efetiva  $A_{\text{eff}}$  (expressa como uma porcentagem da abertura  $A$ ) varia em função do ângulo de incidência para um prisma de abertura circular e índice de refração de 1,5.

(RÜEGER, 1979, tradução nossa)

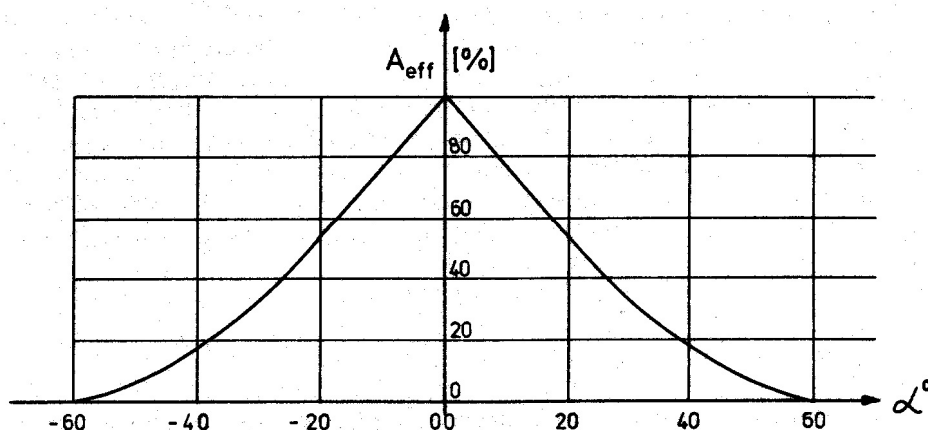


FIGURA 2.9 – VARIAÇÃO DA ABERTURA EFETIVA EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA  
 FONTE: RÜEGER, 1989

Do ponto de vista de um observador externo, uma característica notável deste tipo de prisma é a inversão da horizontal e vertical da imagem de um observador. Assim como um diedro formado por dois espelhos planos em esquadro ou um prisma de Porro acarretam a inversão lateral da imagem de um observador em relação à aresta, o triedro tri-retângulo formado pelas faces do cubo inverte horizontal e verticalmente a imagem do observador em relação ao vértice do cubo.

A aparência hexagonal do prisma é uma ilusão de ótica decorrente desta característica. Na verdade o que um observador externo vê são as três arestas definidas pelas três faces do canto do cubo (combinadas duas a duas) e também os três reflexos correspondentes (cada um deles na face restante de cada das combinações).

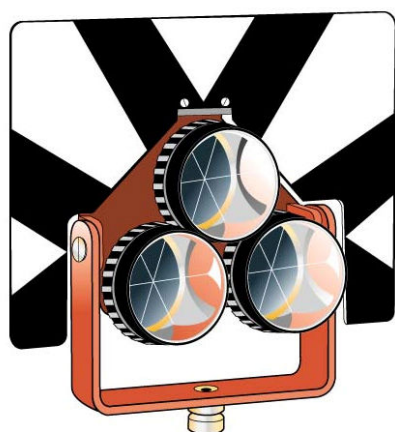
O centro deste hexágono aparente é um ponto natural para se efetuar a pontaria pela luneta de uma estação total na medição de direções horizontais e de ângulos verticais. Além disto, usualmente os primas usados em levantamentos



contém marcações externas em forma de setas alinhadas com o centro geométrico do prisma e que facilitam a pontaria a distâncias relativamente longas ou em condições relativamente precárias de iluminação.

A divergência do feixe de laser enviado pelo MED é pequena, mas não é desprezível. Como consequência deste fato, com o aumento da distância a frente de ondas do feixe se torna progressivamente maior e o prisma reflete uma menor quantidade dos sinais incidentes, limitando o alcance da medição de distância. Arranjos com múltiplos prismas, como na figura 2.10, ampliam o alcance de uma estação total por um simples motivo: os sinais retro-refletidos em cada prisma se somam no dispositivo sensor da estação, o que resulta em aumento do nível do sinal de retorno.

Montagens de prisma triplo modelo 63-2600 e 63-2000



Suporte Leica GPH3 para montagem de 3 prismas circulares GPR1



FIGURA 2.10 – PRISMAS MÚLTIPLOS PARA AUMENTO DO ALCANCE DA MEDIÇÃO  
FONTE: LEICA GEOSYSTEMS (2010) e WILD WOMAN COMPANY (2010)

Como estes arranjos são usados para medir distâncias relativamente longas, exigem uma pontaria mais exata e um melhor alinhamento do conjunto em relação à linha de visada para que a exatidão das medidas de direção, ângulo vertical e distância seja mantida.

O uso de estações totais robotizadas para o controle do posicionamento cinemático de máquinas – geralmente em terraplenagem e em mineração – levou ao desenvolvimento de prismas especiais, onde o alinhamento do prisma em relação à



linha de visada fosse praticamente indiferente. Estes arranjos, ilustrados na figura 2.11, são genericamente denominados de prismas 360° ou de prismas robóticos.



FIGURA – 2.11 PRISMAS DE REFLEXÃO EM 360°  
FONTE: BASELINE EQUIPAMENT COMPANY (2012) & LEICA GEOSYSTEMS (2010)

Em geral os prismas 360° são montados a partir de um arranjo radial de 6 prismas circulares (figura 2.11 / esquerda) ou pela justaposição de 6 prismas tipo canto de cubo (figura 2.11 / centro e direita). O comportamento típico resultante para a abertura relativa (e taxa de reflexão) encontra-se ilustrado na figura 2.12 (comparar com a figura 2.9).

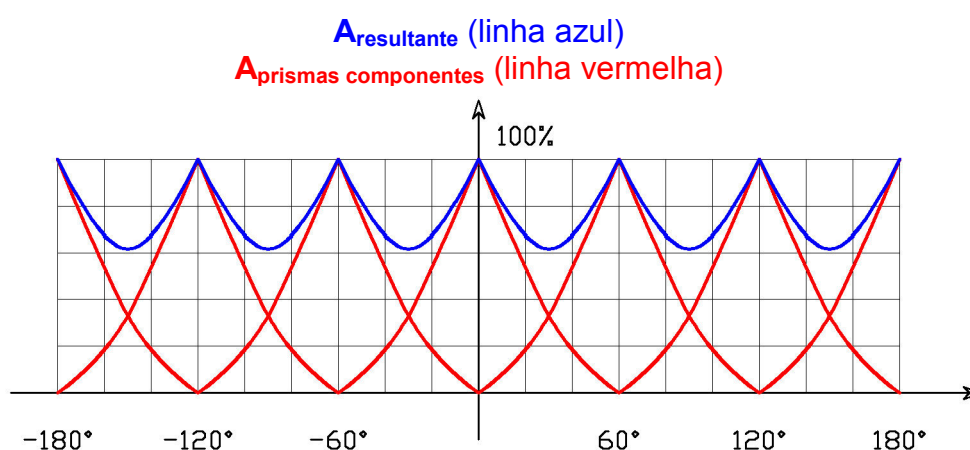


FIGURA 2.12 – VARIAÇÃO DA ABERTURA RELATIVA EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA NOS PRISMAS 360°  
FONTE: Autor (2010)

Um prisma 360° solidário a um veículo e estrategicamente posicionado – por exemplo, no centro geométrico do mesmo – permite o uso de uma estação total robotizada na determinação de posição deste veículo, desde que seja mantida uma visada direta e livre de obstruções. Arranjos como o ilustrado no lado direito da figura 3.34 (ver seção Metodologia) podem posicionar uma estação remota GNSS RTK solidariamente a um prisma 360°, o que viabiliza o uso simultâneo de sistemas de posicionamento por estações totais robotizadas e por sistemas GNSS RTK.

#### 2.1.6 Estações totais robotizadas

Cheves (2003) menciona que a primeira estação total robotizada foi introduzida no ano de 1990, o *System 4000* da então *Geodimeter*.



FIGURA 2.13 – GEODIMETER SYSTEM 4000: A PRIMEIRA ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA  
FONTE: AGA ADVANCED GEODETIC APLICATIONS (2010)

Chua (2004) menciona a incorporação de servomotores no sistema para direcionar automaticamente o instrumento para um ponto específico e que o sistema permitia levantamentos remotos em que apenas um operador era necessário para apontar o instrumento para um alvo específico. Menciona ainda que a série *System 4000* também permitiu levantamentos robóticos, situação em que instrumento podia ser completamente controlado a partir da haste do prisma, sem a necessidade de um operador posicionado junto ao instrumento.

Entre outros fatos notáveis relacionados ao desenvolvimento histórico das estações totais, Cheves (2003) destaca que:

No ano de 1994, o *System 600* foi introduzido. Com a introdução deste instrumento, ele trouxe toda a capacidade de *upgrade* modular encontrada atualmente nos instrumentos da Geodimeter. O *Tracklight* é usado para a obtenção de linhas e o *Autolock* provê ajuste fino para um alvo. O recurso de *Autolock* é baseado em um alvo “ativo” que transmite o sinal infravermelho para o rastreamento e que pode ser operado sob condições de baixa luminosidade. No mesmo ano, o sistema de teclado destacável também foi introduzido, que pode ser conectado a um computador pessoal para *download* e *upload* de dados. A adição do *Remote Positioning Unit (RPU) radio-link* permitiu modo robótico pleno para a estação total robotizada.

(CHEVES, 2003, tradução nossa)

Estes recursos facilitavam tanto a realização de determinadas tarefas realizadas durante os levantamentos quanto de outras tarefas tipicamente realizadas em escritórios. Qualquer análise comparativa de modelos atuais de estações totais robotizadas pode mostrar que estes recursos estão incorporados ao repertório típico e que as variações ficam mais por conta de nomenclatura e dos valores das especificações do que pela natureza dos recursos funcionais.

Segundo Restscher (2002), “a motorização e a automação das estações totais robotizadas iniciou uma nova, mais rápida e mais efetiva forma de medições em levantamentos. O desenvolvimento de estações com procura e seguimento do sistema refletor abriu novas possibilidades para a utilização em todas as áreas de levantamentos, especialmente na área de levantamentos em engenharia”.

Relativamente ao uso destes recursos, Chua (2004) comenta que “estações totais robotizadas com procura e seguimento automático oferecem, com a ajuda do módulo de seguimento, a possibilidade de seguir e determinar processos cinemáticos como o movimento e a deformação de estruturas de edifícios” e, nesta mesma dissertação, aborda testes realizados para avaliar a confiabilidade e a exatidão dinâmica de estações totais robotizadas. Palazzo *et al.* (2006) também relatam testes de laboratório realizados como o propósito de avaliar o comportamento dinâmico de uma estação total Leica TCRA 1205 em condições controladas e seu posterior emprego no monitoramento dinâmico de pontes.

Obviamente as especificações técnicas e alguns dos recursos das estações totais robotizadas variam conforme o modelo e o fabricante – inclusive, em muitos casos, as expressões descritivas dos recursos são marcas legalmente registradas para impedir seu uso por empresas concorrentes. Porém, alguns recursos são característicos deste tipo de equipamento, ainda que não existam, atualmente, expressões de uso já consagrado para descrevê-los. O *reconhecimento automático de alvos* (RAA)<sup>6</sup> pode ser considerado o principal deles: a partir de uma pontaria grosseira, a estação efetua automaticamente uma procura por um prisma posicionado dentro de certa janela de varredura (usualmente especificada em graus na vertical e em graus na horizontal), reconhece sua posição, localiza o centro do prisma<sup>7</sup> e efetua as medidas solicitadas. Alguns modelos de ETR podem efetuar automaticamente a procura destes alvos. Além disto, após o processo de RAA, parte dos modelos de ETRs pode ser configurada para acompanhar um prisma em movimento e, dentro de certos limites, determinar continuamente suas coordenadas em tempo real – recurso que será doravante denominado de *acompanhamento automático de alvo* (AAA)<sup>8</sup>. Os principais fabricantes de estações totais no mercado mundial – Leica, Nikon, Sokkia, Topcon e Trimble – possuem modelos com estas características.

O acompanhamento automático de um alvo pode, sob certas condições, ser usado como um sistema de posicionamento capaz de determinar a posição de um veículo em movimento. Isto é conveniente, por exemplo, em atividades de terraplenagem ou de mineração, onde as velocidades dos veículos são

---

<sup>6</sup> A expressão equivalente em língua inglesa, *Automatic Target Recognition* (ATR), que seria adequada à descrição deste recurso, é uma marca registrada da empresa *Leica Geosystems*,

<sup>7</sup> Como a refletividade do prisma se dá na direção da própria estação e é usualmente muito superior à de qualquer objeto natural ou artificial no seu entorno (e que geralmente proporcionam apenas reflexão difusa), a varredura feita pela estação total robotizada numa área de procura acaba gerando picos bem definidos de intensidade do sinal refletido e a partir dos quais é possível refinar os subseqüentes processos de pontaria.

<sup>8</sup> Por exemplo, nas estações totais robotizadas da empresa *Leica Geosystems* este recurso é denominado de *Lock*. Nas da *Trimble* é chamado de *Autolock*.

relativamente baixas e onde usualmente são implantadas redes locais de pontos de controle em posições estratégicas e com visada livre para a(s) área(s) em trabalho.

Outro recurso característico das estações totais robotizadas é poder efetuar o processo de RAA para seqüências de alvos armazenados em sessões anteriores ou em posições conhecidas antecipadamente, mesmo que de forma apenas aproximada. Este recurso é adequado ao monitoramento de estruturas, uma aplicação na qual as ETRs se mostraram particularmente úteis porque permitiram a realização de séries de observações nos pontos de forma mais rápida que no processo de pontaria tradicional.

Em ETRs de posicionamento fixo e controladas remotamente é possível, inclusive, efetuar levantamentos periódicos das mesmas seqüências de alvos a fim de monitorar as deformações da estrutura em função do tempo. Este processo é interessante, por exemplo, no monitoramento de grandes barragens (GRANEMANN, 2005; ZOCOLLOTTI FILHO, 2005) e, também, de edificações suspeitas de perigo de desabamento. O estudo do comportamento dinâmico de estruturas como pontes sob condições de tráfego variável é, também, uma aplicação que pode empregar este recurso (PALAZZO, 2008).

Ainda com respeito ao acompanhamento de alvos em movimento, convém mencionar que os programas que gerenciam os processos de acompanhamento usualmente empregam previsão de movimentos futuros e que, tipicamente, este processo se baseia em filtros de Kalman. O acompanhamento automático do alvo (prisma) continua a acontecer mesmo na ocorrência de obstruções momentâneas e de interrupções relativamente curtas. Neste tipo de aplicação são usados prismas de reflexão em 360° (figura 2.11) porque manter a orientação do prisma em direção à estação seria algo impraticável. *Links* de rádio dedicados permitem à ETR transmitir esta informação em tempo real para outros sistemas nos quais a posição momentânea do prisma seja necessária. Por exemplo, um levantamento batimétrico em um lago pode usar como coordenadas horizontais os valores das coordenadas obtidas pelo seguimento de um prisma 360° estrategicamente posicionado sobre a embarcação e que é acompanhado automaticamente pela estação (WOLF, 2003).

### 2.1.7 Estações totais robotizadas integradas a sistemas GNSS e a sistemas de imagem

Em meados da década de 2000, mais um paradigma associado a estações totais foi estabelecido: a operação conjunta e totalmente integrada de ETRs com receptores GNSS para aplicações topográficas e geodésicas – outro arranjo funcional ainda sem uma expressão de uso consagrado para descrevê-lo<sup>9</sup> e que, doravante, será denominado de *estação total robotizada com integração GNSS* (ETR-GNSS).

Uma ETR com integração GNSS (figura 2.14) pode combinar automaticamente e em tempo real as informações efetuadas pela ETR e pelo sistema GNSS, expressando os resultados tanto em sistemas de coordenadas topográficas (que são localmente estabelecidos) quanto em sistemas de geodésicos de referência (que podem escolhidos entre as opções incorporadas ao instrumento ou, se necessário, redefinidos pelo usuário).



FIGURA 2.14 – ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA COM INTEGRAÇÃO GNSS  
FONTE: LEICA GEOSYSTEMS (2010)

<sup>9</sup> Também neste caso, algumas expressões descritivas dos recursos são marcas registradas legalmente (*Trade Marks / TM*) e, portanto, de uso restrito dos detentores do registro. Por exemplo, a expressão *Smart Station™*, é usada pela *Leica Geosystems* para descrever os arranjos ETR-GNSS da referida empresa, apesar de não ser tão facilmente associada a um recurso como a já citada expressão *Automatic Target Recognition™*, (ATR), usada pela mesma empresa para descrever o recurso de reconhecimento automático de alvos.

Este arranjo funcional provê versatilidade ao sistema. Se o operador já dispuser de um ponto estação conveniente com coordenadas conhecidas e de uma direção de referência, ele pode começar a trabalhar operando em qualquer um dos sistemas de coordenadas. Caso não disponha, o operador pode, por exemplo:

1. ocupar um primeiro ponto estação conveniente, orientar a ETR em relação a um segundo ponto estação a ser ocupado e iniciar os levantamentos com a ETR num sistema de coordenadas provisório enquanto o sistema GNSS vai, simultaneamente, determinando as coordenadas deste primeiro ponto estação;
2. ocupar o segundo ponto estação e orientar a ETR em relação ao primeiro;
3. uma vez determinada a posição do segundo ponto estação via GNSS, usar a ETR para transformar automaticamente todas as coordenadas obtidas no primeiro ponto estação (até então expressas no sistema de coordenadas provisório) para o sistema de coordenadas escolhido para o levantamento completo;
4. determinar as coordenadas dos novos pontos visados já no sistema de coordenadas escolhido.

Foge ao escopo deste trabalho detalhar outras situações em que o uso de apenas uma ETR ou de um sistema GNSS teria limitações de emprego. Porém, convém manter em vista que, de modo geral, os arranjos ETR-GNSS procuram combinar em tempo real o que as ETRs e os sistemas GNSS poderiam oferecer de melhor a cada momento e apresentar todos os resultados num sistema de coordenadas único, escolhido pelo usuário conforme a conveniência do levantamento em questão.

A combinação do recurso de medição de distância sem prisma com os recursos típicos proporcionados pelas estações totais robotizadas viabilizaram recursos adicionais como o escaneamento de superfícies a longa distância, um

recurso particularmente útil em mineração, em algumas obras de terraplenagem e no monitoramento de encostas.

Alguns modelos de ETR dos fabricantes de maior tradição já oferecem este tipo de recurso. Alguns modelos também incorporam funções adicionais relacionadas a imagens capturadas por câmaras fotográficas digitais incorporadas ao equipamento (figura 2.15).

Num resumo cronológico:

1. A partir da década de 1980, as estações totais progressivamente se tornaram o principal instrumento de uso em topografia por permitirem a medição de distâncias, ângulos, desníveis e coordenadas de forma simultânea e instantânea.
2. Posteriormente, a medição de distâncias sem prisma acrescentou facilidades de uso.
3. No princípio da década de 1990, o surgimento de estações totais robotizadas propiciou recursos como o reconhecimento automático de alvos e seu seguimento.
4. Em meados da década de 2000 a integração de estações totais robotizadas com sistemas GNSS resultou em arranjos que procuram combinar e integrar o que as técnicas de levantamentos com estação total e as técnicas de levantamentos GNSS podem oferecer de melhor.





**LONG RANGE**  
TECHNOLOGY

## Does more than a robotic instrument! Does more than a laser scanner!

The Topcon IS combines the power of both a laser scanner and a robotic instrument into one superior long-range, imaging robotic system.

### How it Works

Topcon's IS features dual digital imaging CMOS cameras providing a color, real-time image on the touch sensitive LCD display. To define a scan area, simply tap the image display, or for uniform measurement of an area, select the grid feature. The IS "locks" these points to their exact position on the image, even when the instrument is rotated. Once all points to be measured are chosen, the IS performs a reflectorless measurement of each point.





Image Display Buttons  
Image Operation Mode Settings



Image Operation Mode Settings















**TOPCON**  
It's time.

**Topcon Positioning Systems, Inc.**  
7400 National Drive  
Livermore, CA 94550  
[www.topconpositioning.com](http://www.topconpositioning.com)




Specifications subject to change without notice.  
©2008 Topcon Corporation All rights reserved.  
P/N: 7010-0876 Rev. A Printed in U.S.A. 03/08



Set points to scan on the LCD with a tap...

FIGURA 2.15 – ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA *TOPCON IMAGING STATION*  
FONTE: TOPCON (2010)

## 2.2 MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO

### 2.2.1 Conceito de modelo e critérios de avaliação

Li, Gold e Zu (2004) comentam que “as pessoas vivem na Terra e aprendem a lidar com seus terrenos”. Citam diferentes ramos de atividade e observam que “Diferentes áreas do conhecimento relacionadas às geociências, ou que empregam

ferramentas por elas disponibilizadas, possuem como interesse comum a representação da superfície do terreno dentro uma determinada acurácia”. Esta acurácia usualmente é ditada pelas necessidades da aplicação pretendida e, também, pela limitação dos equipamentos e técnicas disponíveis para os levantamentos.

Meyer (1985)<sup>10</sup> citado por Li, Gold e Zu (2004) define *modelo* como “... um objeto ou um conceito que é usado para representar algo mais. Ele é a realidade numa escala menor e convertido para uma forma que possamos compreender”. Os mesmos autores classificam, de modo geral, os modelos em três categorias: conceituais, físicos e matemáticos, comentando que os modelos conceituais se iniciam na mente de uma pessoa e que usualmente são seguidos por um modelo físico ou matemático com capacidade de representar a realidade de forma conveniente e de permitir sua visualização.

Meyer (1985) também relaciona e comenta seis critérios de avaliação da boa qualidade de modelos matemáticos, aos quais Li, Gold e Zu (2004), que o citam, acrescentam o critério da *simplicidade*: usam-se no modelo o menor número possível de parâmetros.

1. *Acurácia*: a saída do modelo é correta ou muito aproximadamente correta;
2. *Realismo descritivo*: baseado em suposições corretas;
3. *Precisão*: a predição do modelo é de números, funções ou figuras geométricas definidos;
4. *Robustez*: relativa imunidade a erros nos dados de entrada;
5. *Generalidade*: aplicabilidade a uma grande variedade de situações;
6. *Fecundidade*: as conclusões são úteis, ou inspiradoras e apontando o caminho para outros bons modelos.

### 2.2.2 Modelo digital do terreno

Miller e Laflamme (1958) introduziram o conhecido conceito de Modelo Digital do Terreno / *Digital Terrain Model* (MDT/DTM) através da seguinte definição:

---

<sup>10</sup> MEYER, W. J. **Concepts of Mathematical Modeling**. Dover, 1984.

O modelo digital do terreno (MDT) é simplesmente uma representação estatística da superfície contínua do solo por meio de grande número de pontos selecionados com coordenadas X, Y, Z conhecidas em um sistema de coordenadas arbitrário.

(tradução nossa)

Este “grande número de pontos selecionados com coordenadas conhecidas” constitui uma amostra do terreno – que, em termos estatísticos, constitui a população a ser amostrada. Amostras de tamanho insuficiente não descrevem adequadamente a população que deveriam representar, no caso “a superfície contínua do solo” (figura 2.16). O mesmo pode ser dito de amostras de maiores tamanhos, mas com vícios de escolha.

Na figura 2.16.E foram utilizados como amostra apenas os quatro pontos correspondentes aos limites da área modelada e o resultado é claramente inadequado devido ao insuficiente tamanho da amostra empregada. Na parte superior da figura foram incluídos na amostra pontos representativos das elevações locais máximas e mínimas e, também, de uma ravina relativamente pequena existente na superfície. Neste caso o resultado obtido é bastante representativo da superfície original. Nas situações B, C, D, a progressiva diminuição do tamanho da amostra acarreta uma correspondente perda da qualidade das informações proporcionadas pelo DTM.

A topografia de um terreno pode ser modelada e representada de diversas formas: um conjunto reduzido de pontos cotados é uma delas, embora bastante incompleta para a maioria das possíveis aplicações. Um mapa topográfico com curvas de nível é, talvez, a mais familiar das representações do terreno e constitui um modelo bastante denso, em geral suficiente para uma grande variedade de aplicações.

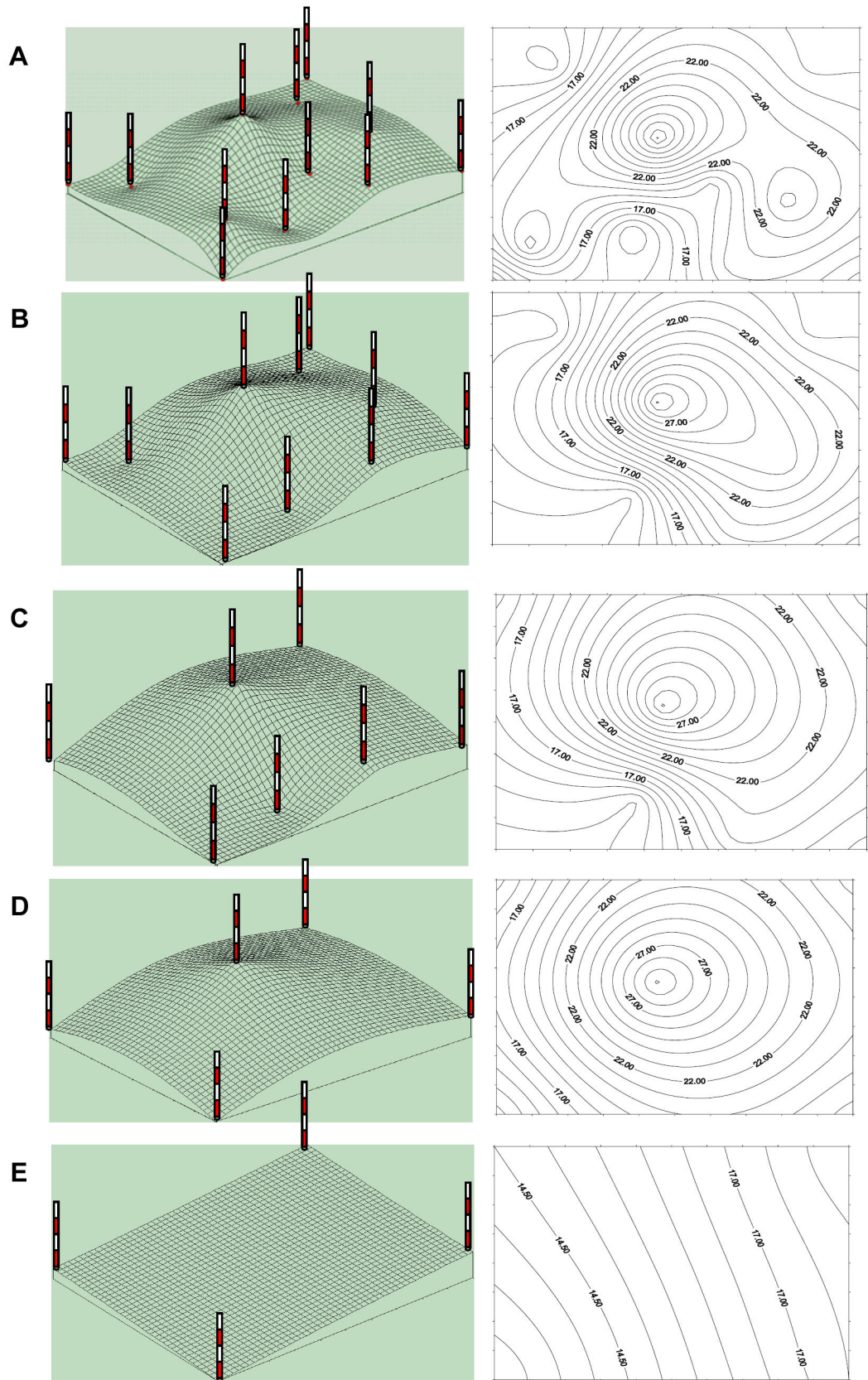


FIGURA 2.16 – RELAÇÃO ENTRE OS PONTOS DA AMOSTRA E AS REPRESENTAÇÕES OBTIDAS A PARTIR DO O DTM RESULTANTE  
 FONTE: VEIGA, 2004

Seções transversais do terreno ao longo de determinadas direções de interesse – também chamados de cortes ou de perfis – são outro tipo de representação e que é particularmente interessante para diversos projetos de Engenharia. Estas seções, conforme o caso, podem tanto ser levantadas *in loco* quanto obtidas a partir do mapa topográfico com as curvas de nível.

Com o uso de DTMs a geração de curvas de nível e de seções transversais do terreno pode ser obtidas diretamente do processamento destes modelos, assim como a cota estimada de quaisquer outros pontos da superfície. Os processamentos podem envolver diversos modelos matemáticos e considerações, mas são usualmente baseados em relações de vizinhança e processos de interpolação, que podem ser globais ou locais. Processos de interpolação globais como os baseados em séries de Fourier e em superfícies de tendência podem descrever de forma satisfatória superfícies sem desníveis abruptos ou anomalias localizadas, situações que podem ser melhor descritas por técnicas locais (BURROUGH, 1986; CINTRA, 1985, 1993; VEIGA, 1996).

A partir do MDT também é possível extrair outras informações como mapas de declividade, divisores de águas e redes de drenagem.

### 2.2.3 Amostragem para geração de MDTs

A amostragem de pontos para geração de um MDT pode ser seletiva, regular, progressiva ou composta (WEIBEL, 1991). Numa amostragem seletiva, caso da figura 2.16.A, escolhe-se um número relativamente pequeno de pontos, mas de notória importância para a descrição do terreno. Numa amostragem regular são selecionados pontos regularmente espaçados formando malhas ou então distribuídos ao longo de linhas que definem seções (cortes, perfis) específicos. Na amostragem progressiva a densidade dos pontos varia em função das características do relevo. A amostragem composta combina as técnicas anteriores a fim de modelar adequadamente feições de especial relevância – por exemplo, uma notória e sinuosa linha de crista que atua como principal divisor de águas na região de interesse.

Em relação aos sistemas de coleta das informações, o quadro 2.2 mostra algumas situações típicas, mas convém destacar que tais procedimentos podem variar de situação para situação.

TIPO DE AMOSTRAGEM	SISTEMAS DE COLETA DE DADOS
Seletiva	Estação total, GPS
Regular	Sistemas de escaneamento a laser,, estações totais robotizadas (ETRs) e Processos fotogramétricos.
Progressiva	Diversos, conforme a situação.
Combinada	

QUADRO 2.1 AMOSTRAGEM E COLETA DE DADOS PARA DTM  
FONTE: Autor (2010)

Por exemplo, alguns modelos de estações totais robotizadas (ETRs), devidamente posicionadas e orientadas, podem efetuar uma varredura no terreno a partir de coordenadas e de intervalos definidos pelo usuário. Este procedimento (que emprega o sistema de medição de distância por laser e dispensa o posicionamento de um prisma sobre os pontos visados) pode permitir, por exemplo, a geração de um DTM preliminar em áreas perigosas a fim de identificar área de maior risco onde seriam convenientes levantamentos posteriores de maior densidade (LAMBROU; PANTAZIS, 2006). A quantidade de informações gerada será, tipicamente, muito inferior à da nuvem de pontos obtida com um sistema laser scanner terrestre, mas sua exatidão é superior.

## 2.3 POLÍGONOS E LINHAS POLIGONAIS

Polígonos são, em diversas áreas de conhecimento, uma forma conveniente de delimitar uma região de interesse para um determinado trabalho. O mesmo conceito pode ser usado para delimitar uma ou mais regiões no interior da região principal e que, por motivos diversos, devem ser trabalhadas de formas distintas da

área principal ou mesmo desconsideradas. A versatilidade das formas possíveis e a facilidade de representação dos polígonos em formatos vetoriais contribuem para esta conveniência.

Os polígonos são, por definição, figuras geométricas planas, fechadas e compostas por linhas retas. Já em Topografia e em Levantamentos utiliza-se a expressão linhas poligonais para definir genericamente entidades geométricas formadas por uma sequência de linhas retas consecutivas no espaço que se unem em pontos notáveis materializados no terreno de forma provisória ou, em alguns casos, permanente. Se a sequência é fechada em si mesma usam-se as expressões linha poligonal fechada ou simplesmente poligonal fechada, caso contrário linha poligonal aberta ou, de forma concisa, poligonal aberta.

A análise das linhas poligonais costuma ser facilitada pela decomposição de cada segmento em suas componentes horizontais e em sua componente vertical. Por questões de ordem prática, conceitual e funcional, as componentes horizontais (também chamadas de planimétricas) são, na maioria das vezes, associadas ao plano  $xy$  e a componente vertical ao eixo  $z$ . Além disto, em geral (mas não sempre e nem necessariamente) as componentes planimétricas de uma linha poligonal topográfica são, em valores absolutos, significativamente maiores que as respectivas componentes verticais.

A projeção horizontal de uma linha poligonal topográfica fechada é um polígono. Em algumas situações práticas, por motivos de concisão, as expressões são usadas de forma indistinta -- o que é um abuso de linguagem, embora o contexto costuma permitir a distinção.

### 2.3.1 Definição geométrica e descrição analítica de um polígono

DOLCE & POMPEO (1985) apresentam a definição clássica de polígono em Geometria Plana da seguinte forma:

Dada uma *seqüência* de pontos de um plano  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$ , com  $n \geq 3$ , todos distintos, onde três pontos consecutivos não são colineares, considerando-se consecutivos  $A_{n-1}$ ,  $A_n$  e  $A_1$ , assim como  $A_n$ ,  $A_1$  e  $A_2$ , chama-se de polígono à reunião dos segmentos  $\overline{A_1A_2}, \overline{A_2A_3}, \dots, \overline{A_{n-1}A_n}, \overline{A_nA_1}$ .

O polígono pode ser então indicado como  $A_1A_2\dots A_{n-1}A_n$  ou simplesmente como polígono  $A$ . Os pontos são denominados de vértices do polígono e os segmentos são denominados de lados do polígono.

Em Geometria Analítica Plana, se satisfeitas as condições que o definem, um polígono pode ser completamente caracterizado pela seqüência de coordenadas de seus vértices:

$$A_1=(x_1,y_1), A_2=(x_2,y_2), \dots, A_{n-1}=(x_{n-1},y_{n-1}), A_n=(x_n,y_n) \quad (2.1)$$

Em determinadas situações, pode ser conveniente o uso de matrizes para descrever os vértices do polígono. Por exemplo, o polígono  $A$  poderia ser associado à uma matriz  $A$  de ordem  $2 \times n$  ou  $n \times 2$ :

$$A_{2 \times n} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{n-1} & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_{n-1} & y_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$A_{n \times 2} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \dots & \dots \\ x_{n-1} & y_{n-1} \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Outra possibilidade é descrever o polígono  $A$  por uma matriz formada por dois vetores com as coordenadas dos vértices. Podem ser usados vetores-linha ou vetores-coluna.



$$\left\{ \begin{array}{l} X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{n-1} \quad x_n] \\ Y = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_{n-1} \quad y_n] \\ A = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} \\ Y = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} \\ A = [X \quad Y] \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Há outras representações possíveis. A opção por um formato depende das conveniências de representação num determinado contexto, escolha de algoritmos a serem usados nos processamento envolvidos, formato dos dados disponíveis, linguagem de programação empregada etc.

### 2.3.2 Polígonos simples e polígonos complexos

Um polígono é dito simples se todas as interseções de dois lados não consecutivos forem conjuntos vazios.

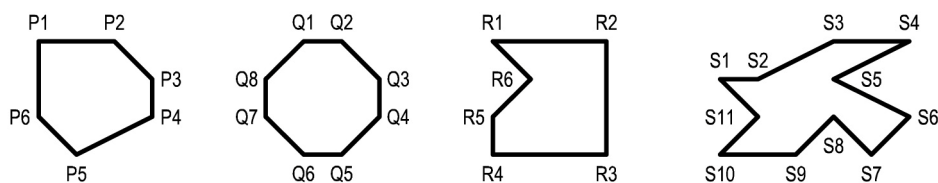


FIGURA 2.17 – EXEMPLOS DE POLÍGONOS SIMPLES  
FONTE: Autor (2012)

Em termos práticos, se um polígono é simples, seus lados não se cruzam em nenhuma situação e os únicos pontos de contato entre lados são os vértices.

Se um polígono não é simples, diz-se que ele é um polígono complexo.

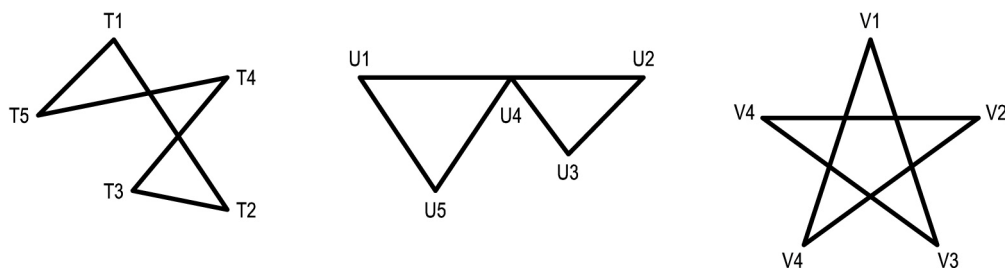


FIGURA 2.18 – EXEMPLOS DE POLÍGONOS COMPLEXOS  
FONTE: Autor (2012)

Se um polígono é complexo haverá pelo menos uma situação em que lados se cruzam (no exemplo, os polígonos T e V), ou uma situação em que um vértice toca um lado que não lhe seja adjacente (no caso, o polígono U).

É possível decompor um polígono complexo em uma série de polígonos simples, mas este processo exige a criação de vértices adicionais nos pontos de cruzamento de lados não consecutivos e nos pontos do contato dos vértices com os lados que não lhe são adjacentes.

### 2.3.3 Polígonos convexos e polígonos côncavos

Um polígono simples é dito convexo se, para cada um seus lados, a reta definida por este lado faz com que todos os demais lados e vértices estejam em um mesmo semiplano.

Se um polígono simples não for convexo, diz-se que ele é um polígono côncavo.

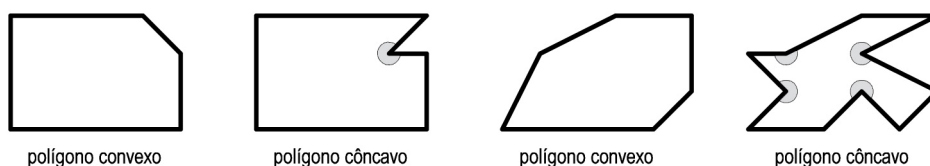


FIGURA 2.19 – POLÍGONOS CONVEXOS E POLÍGONOS CÔNCAVOS  
FONTE: Autor (2012)

Um critério prático para determinar se um polígono simples é convexo é que nenhum de seus ângulos internos deverá ser superior ao ângulo raso ( $180^\circ$ ). Caso contrário, será um polígono côncavo. No caso dos polígonos côncavos, a figura anterior destaca as ocorrências de ângulos internos superiores ao ângulo raso.

#### 2.3.4 Interior e exterior de um polígono simples

O conceito de interior e exterior de um polígono é aplicável aos polígonos simples e no aspecto visual é bastante intuitivo. Em termos de Geometria Plana, um critério objetivo se faz necessário. A definição clássica testa se um ponto é interno ou externo ao polígono e chama de *interior* do polígono o conjunto de todos os seus pontos internos. O conjunto de todos os pontos externos é chamado de *exterior*.

DOLCE & POMPEO (1985) apresentam da seguinte forma o teste para determinar se um ponto é interior ou exterior a um polígono simples:

Dado um polígono simples e um ponto não pertencente a ele. Se conduzirmos uma semirreta com origem no ponto que não passe por um vértice e que intercepte o polígono, se o número de pontos de interseção:

- for ímpar, então o ponto é interno ao polígono;
- se for par, então o ponto é externo ao polígono.

Este teste clássico de Geometria Plana fundamenta a definição de interior e exterior de um polígono e serve de base para diversos algoritmos que testam a relação entre o ponto e o polígono na Geometria Analítica, onde tanto o ponto testado quanto os vértices do polígono são definidos pelos valores das respectivas coordenadas.

### 2.3.5 Distinção entre polígono, interior e superfície poligonal

Chama-se de *superfície poligonal* à região definida pelo polígono e pelo seu interior. A área assim definida também é denominada de *região poligonal*.

Na prática, por questões de concisão, a palavra polígono também é frequentemente usada para se fazer referência ao interior de um polígono ou a uma superfície poligonal. Porém, na maioria das situações de interesse prático o contexto pode indicar claramente se a palavra se refere ao polígono propriamente dito, ao seu interior ou à superfície poligonal por eles definida..

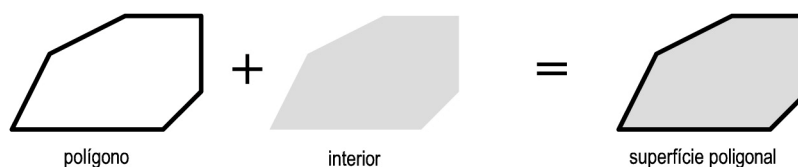


FIGURA 2.20 – POLÍGONO, INTERIOR E SUPERFÍCIE POLIGONAL  
FONTE: Autor (2012)

### 2.3.6 Polígonos vazados

O uso de polígonos também permite delimitar uma ou mais regiões no interior de uma região principal e que devem ser trabalhadas de formas distintas ou mesmo desconsideradas.

A figura 2.21 ilustra esta situação. Em português, a expressão polígono vazado pode ser usada para descrevê-la de forma sucinta. Em inglês, associadas à palavra *polygon*, encontram-se expressões como "*holes*", "*void areas*" e "*hollow*

*areas*", freqüentemente entre aspas e seguidas de explicações para caracterizar o contexto de uso, o que reflete a situação de ainda não haver uma nomenclatura de uso consagrado para descrever este tipo de situação. Doravante, neste trabalho, será adotada a expressão *polígonos vazados* para descrever genericamente situações desta natureza ou similares.

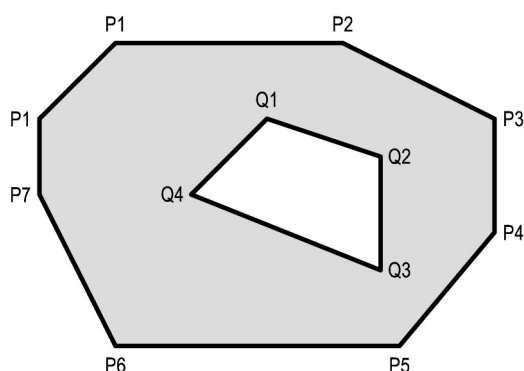


FIGURA 2.21 – EXEMPLO DE POLÍGONO VAZADO  
FONTE: Autor (2012)

O interior do polígono Q é obviamente excluído, mas conforme a situação, o polígono Q pode ou não ser incluído e o mesmo vale para o polígono principal P. Admitindo-se que os dois devam ser incluídos, seria possível descrever de forma exata a área de interesse da seguinte maneira:

$$\text{área de interesse} = \text{superfície poligonal (P)} - \text{interior (Q)} \quad (2.6)$$

A figura 2.22 ilustra um polígono com múltiplas áreas de exclusão (áreas vazadas, "buracos", vazamentos). Neste exemplo a área de interesse poderia ser descrita pela superfície poligonal R subtraída dos interiores dos polígonos S, T, U.

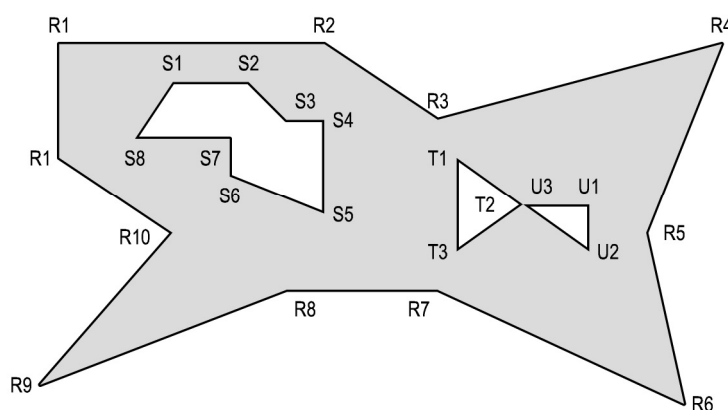


FIGURA 2.22 – EXEMPLO DE POLÍGONO COM VÁRIAS ÁREAS VAZADAS  
FONTE: Autor (2012)

Na descrição de um polígono vazado é conveniente que todos os polígonos envolvidos sejam polígonos simples (porque o conceito de interior não se aplica aos polígonos complexos) e sem superposição (o contato de um vértice de um polígono com um vértice ou com um lado de outro polígono, inclusive o polígono principal é aceitável). Com base no exposto, a descrição da área de interesse do exemplo anterior poderia ser feita por:

$$\begin{aligned}
 \text{área de interesse} = & \text{superfície poligonal (R)} - \text{interior (S)} \\
 & - \text{interior (T)} \\
 & - \text{interior (U)}
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Um polígono vazado pode então ser descrito por um conjunto de matrizes onde a primeira matriz está associada ao polígono principal e cada uma das matrizes subseqüentes está associada a uma área de exclusão (vazamento) descrita pelo respectivo polígono.

Outra forma de lidar com a situação é decompor um polígono vazado em um conjunto de polígonos simples adjacentes. O número de "polígonos componentes", a quantidade de lados de cada um deles e os lados compartilhados dependem da decomposição escolhida, que pode variar em função das conveniências de tratamento de um determinado problema. Além disto, sempre é possível decompor um polígono vazado em uma rede de triângulos irregulares (TIN – *Triangulated Irregular*

*Network*), que é uma generalização mais versátil e que, no caso dos polígonos vazados, tem a vantagem de ser determinística.

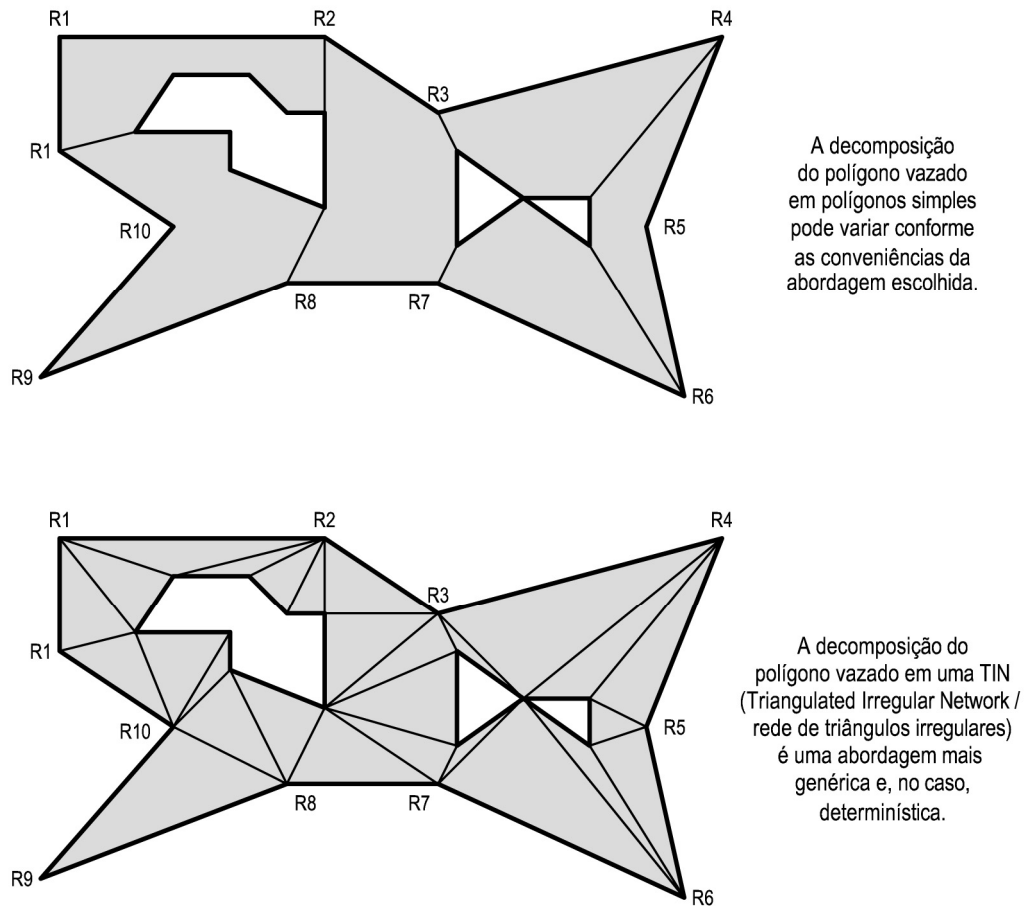


FIGURA 2.23 – EXEMPLOS DA DECOMPOSIÇÃO DE UM POLÍGONO VAZADO EM UM CONJUNTO DE POLÍGONOS SIMPLES  
FONTE: Autor (2013)

### 2.3.7 Algoritmo do lançamento de raios

Uma forma de testar se um ponto qualquer de um plano encontra-se no lado de dentro ou no lado de fora de um polígono é o *algoritmo de lançamento de raios* (*ray casting algorithm*), que praticamente se confunde com o critério que define se um ponto está ou não no interior de um polígono simples.

O conceito geométrico de raio considerado pelo algoritmo, ilustrado na figura 2.24 é o de uma semi-reta que se estende do ponto considerado até o infinito numa direção fixa. Desconsiderando-se os casos particulares em que o ponto testado encontra-se sobre um dos lados do polígono ou é coincidente com um dos vértices, o algoritmo de lançamento de raios pode ser enunciado da seguinte forma:

- *Dado um ponto e um raio partindo do mesmo em qualquer direção, se o número de cruzamentos do raio com as arestas do polígono for ímpar o ponto encontra-se dentro do polígono; se o número de cruzamentos for par o ponto encontra-se fora.*

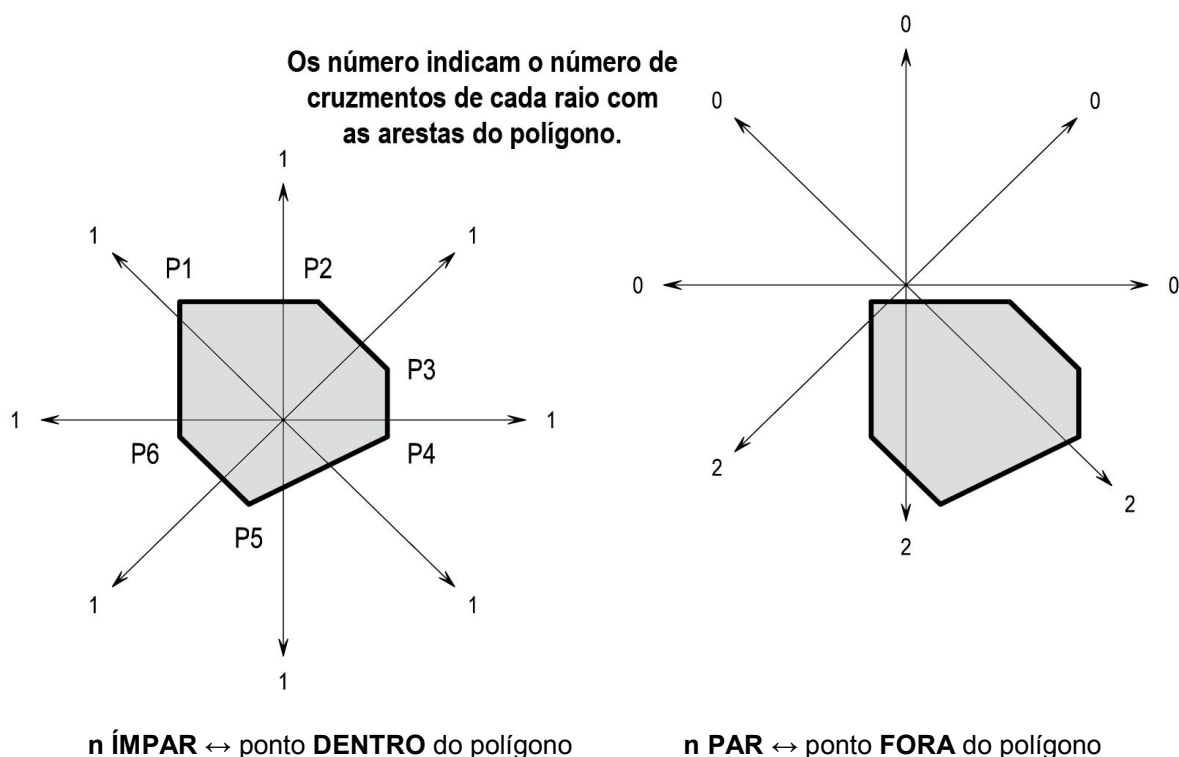


FIGURA 2.24 – EXEMPLOS DO ALGORITMO DE LANÇAMENTO DE RAIOS EM POLÍGONOS CONVEXOS  
FONTE: Autor (2012)

O enunciado acima explica porque este algoritmo também é chamado de *algoritmo do número de cruzamentos*. Independentemente do nome adotado, ele possui duas características que o tornam bastante versátil:



1. *Funciona tanto com os polígonos simples (não importa se convexos ou côncavos) quanto com os polígonos vazados (figuras 2.24, 2.25 e 2.26);*
2. Para o teste de um ponto, *qualquer direção serve.*

Como a direção do raio de teste pode ser qualquer uma, as direções paralelas aos eixos horizontal e vertical do sistema de coordenadas são uma escolha natural porque, em geral, simplificam a construção de funções ou rotinas que analisem a relação entre um ponto do plano e o polígono considerado.

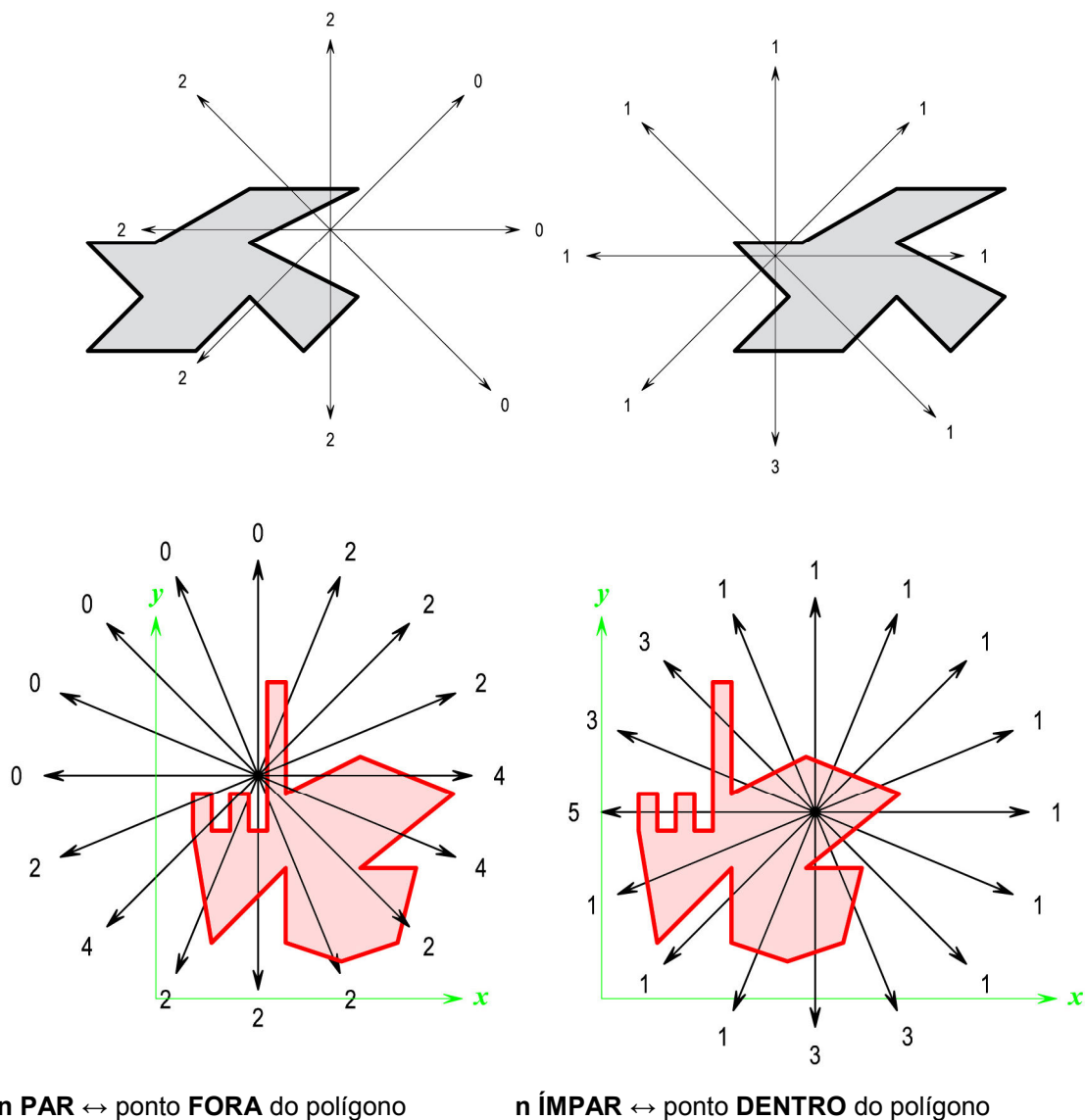


FIGURA 2.25 EXEMPLOS DO ALGORITMO DE LANÇAMENTO DE RAIOS  
EM POLÍGONOS CÔNCAVOS  
FONTE: Autor (2012)

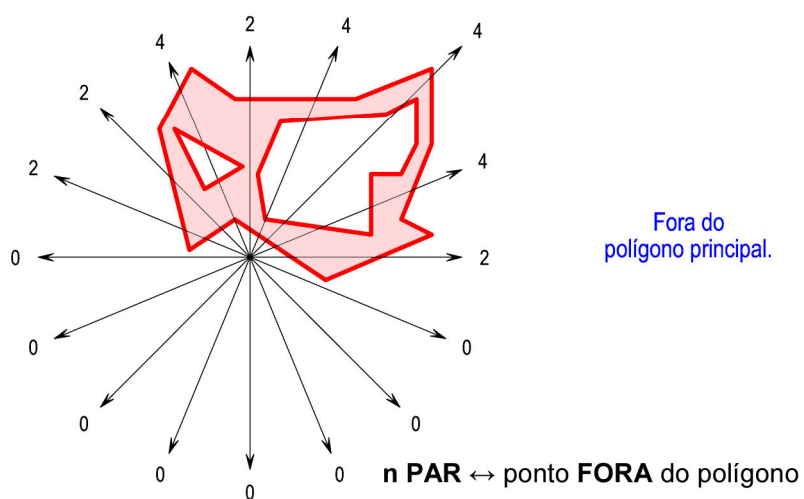
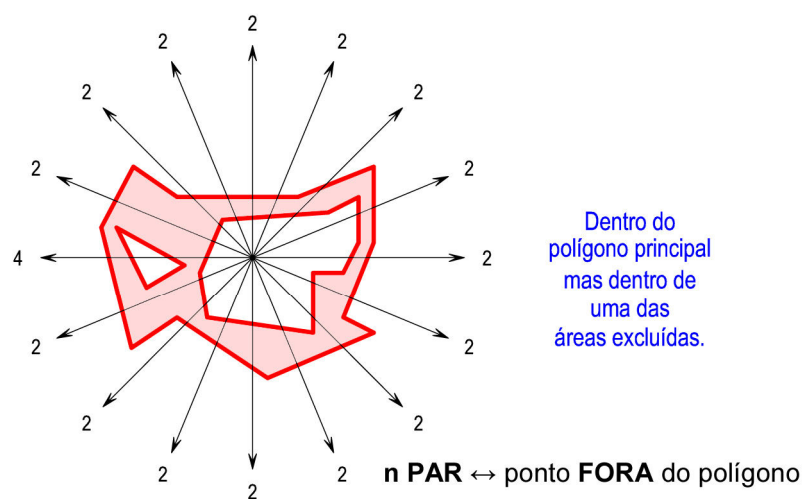
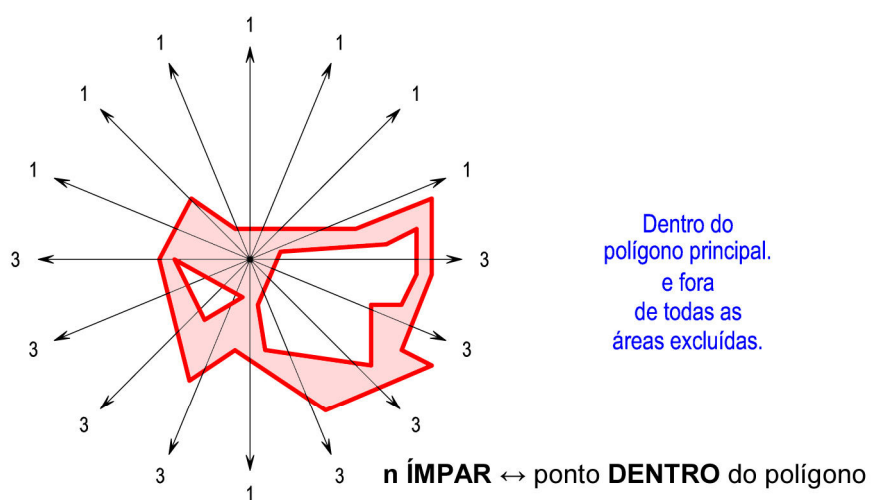


FIGURA 2.26 – EXEMPLO DO ALGORITMO DO LANÇAMENTO DE RAIOS NUM POLÍGONO VAZADO  
FONTE: Autor (2012)

### 2.3.8 Observações sobre a implementação do algoritmo do lançamento de raios

Uma implementação rigorosa do algoritmo do lançamento de raios tem de considerar a situação de pontos sobre o polígono e o resultado desejado para este tipo de situação – e que pode variar conforme a aplicação envolvida. Em tais situações é possível:

1. Gerar uma indicação específica para a condição de ponto sobre o polígono;
2. Gerar uma indicação de ponto exterior;
3. Gerar uma indicação de ponto interior.

A indicação 1 é a mais objetiva das três. Sendo necessário escolher entre as indicações 2 e 3, a princípio esta última é mais adequada pois o resultado mostra se o ponto testado pertence ou não à região poligonal (polígono + interior do polígono).

Outra questão a considerar na implementação é se o algoritmo deve lidar ou não com polígonos complexos – e, em caso afirmativo, como.

As operações de ponto flutuante usadas no processamento dos dados, devido aos inevitáveis arredondamentos, podem eventualmente gerar resultados enganosos para pontos sobre o polígono ou muito próximos ao mesmo. Uma forma de lidar com esta questão é assumir uma distância mínima abaixo da qual o ponto seria efetivamente considerado sobre o polígono. Em linhas gerais, esta observação também se aplica a outros testes, algoritmos e funções relacionados a polígonos e outras entidades geométricas.

Não existe resposta única para estas questões, mas considerar o contexto da aplicação é importante para balizar a escolha de uma solução previamente disponível, sua adaptação ou um novo desenvolvimento.

### 2.3.9 Testes analíticos em polígonos

O uso de polígonos para delimitar regiões de interesse – ou de exclusão – requer, na maioria das situações, polígonos do tipo simples. Esta condição elimina os entrelaçamentos e eventuais pontos de contato de um polígono complexo – que podem gerar problemas de interpretação e mesmo de falta de sentido – e, em geral, torna o problema tratável.

Testar analiticamente e de forma antecipada se uma seqüência de pares ordenados representa um polígono – e, em caso afirmativo, se representa um polígono simples – é um procedimento recomendável no uso de diversas funções e algoritmos relacionados a estas figuras geométricas.

Também pode ser necessário testar se um polígono é convexo porque existem funções e algoritmos que são aplicáveis apenas a este tipo de polígono.

#### 2.3.9.1 Teste analítico da definição de polígono

Para que uma seqüência de pontos  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$  represente um polígono, todas as seqüências de três pontos, *sem exceção*, deverão ser não colineares. Isto pode ser expresso analiticamente pela seguinte condição<sup>11</sup>:

$$\begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, n-3, n-2, n-1 \\ j = 2, 3, 4, \dots, n-2, n-1, n \\ k = 3, 4, 5, \dots, n-1, n, 1 \end{cases}$$

<sup>11</sup> Neste texto as barras verticais indicam o determinante da matriz. As matrizes são indicadas através com seus elementos entre colchetes.

Uma seqüência de  $n$  pares ordenados é testada em  $n-2$  etapas. Se em todas elas for verificada a condição de não-colinearidade, então a seqüência define um polígono.

### 2.3.9.2 Teste analítico da convexidade de um polígono

Com  $n$  etapas é possível testar analiticamente se uma seqüência  $n$  de pontos representa um polígono convexo. Um resultado positivo garante também que o polígono é simples. A figura 2.27 ilustra uma possível estratégia de teste

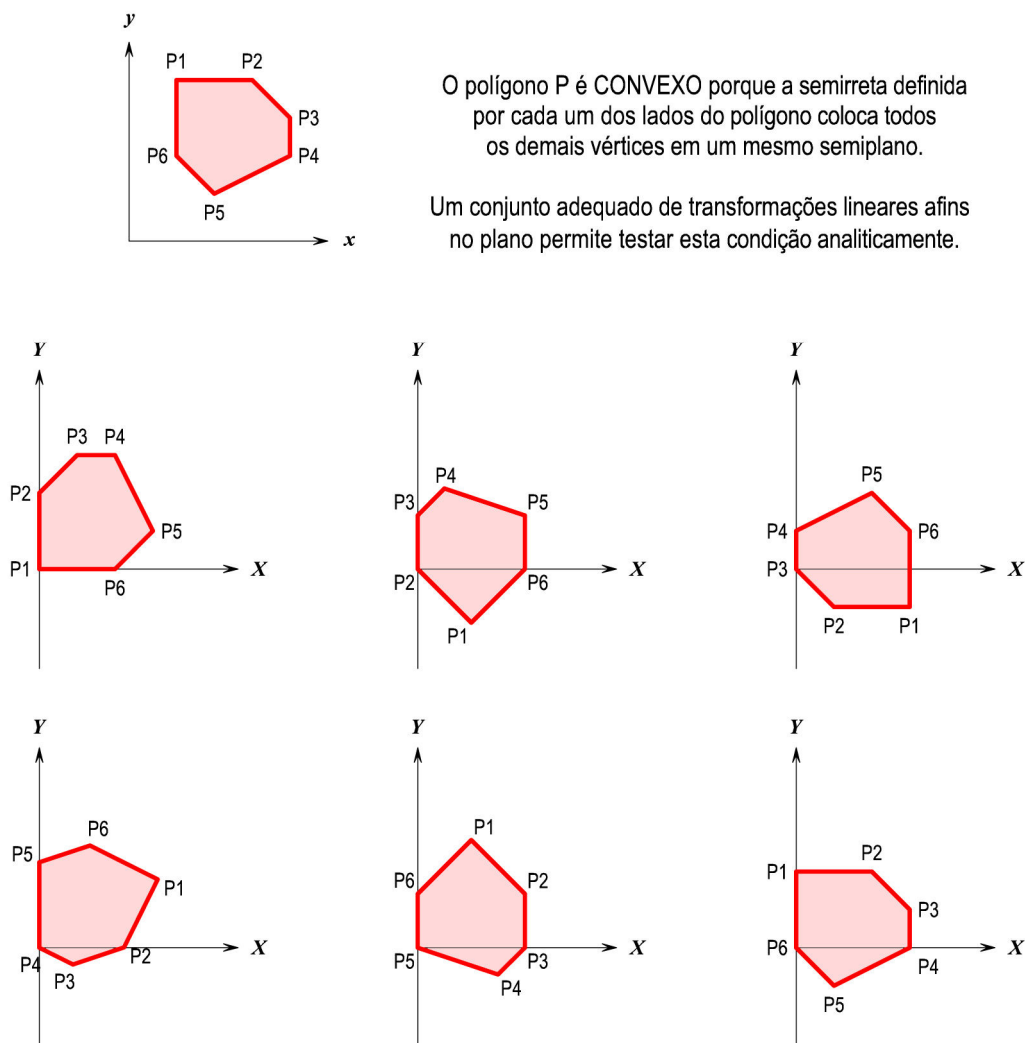


FIGURA 2.27 – TESTE DE CONVEXIDADE EM UM POLÍGONO (RESULTADO POSITIVO)  
FONTE: Autor (2012)

Em cada uma destas transformações:

- São calculadas as coordenadas de todos os vértices no novo sistema de referência;
- Verifica-se se em todos eles o valor da coordenada  $x$  é maior ou igual a zero; se forem, isto garante que os vértices estão todos no semi-plano  $x \geq 0$ .

Se esta condição se repetir para cada lado/transformação, isto garante que o polígono seja efetivamente convexo porque, por definição, "um polígono simples é dito convexo se, para cada um de seus lados, a reta definida por este lado faz com que todos os demais lados e vértices estejam em um mesmo semi-plano."

A transformação de similaridade no plano, também chamada de transformação de similaridade de quatro parâmetros (WOLF & GHILANI, 1996, p. 335) é adequada a este tipo de teste por manter a forma do polígono após a transformação. Para cada lado do polígono sob teste, os quatro parâmetros de transformação podem ser (a) fator de escala unitário, (b) ângulo de rotação definido pela orientação do lado e (c) parâmetros de translação em  $x$  e em  $y$  definidos pelas coordenadas do primeiro vértice do lado considerado -- que, por consequência, sempre assume a coordenada  $(0,0)$ , no novo sistema de referência.

$$\left\{ \begin{array}{l} S = 1 \\ \theta = \arctan \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \\ T_x = x_i \\ T_y = y_i \\ i = 1, 2, \dots, n-2, n-1, n \\ j = 2, 3, \dots, n-1, n, 1 \end{array} \right. \quad (2.9)$$

É importante observar que, no caso, o ângulo  $\theta$  seja gerado com uma função arco-tangente com imagem nos quatro quadrantes – como, por exemplo, as funções *atan2* do Matlab e do Excel, onde o duplo argumento  $(x, y)$  permite tal distinção<sup>12</sup>.

A figura 2.28 ilustra o resultado do teste aplicado ao polígono R, onde os resultados obtidos para os lados  $R_5R_6$  e  $R_6R_1$  garantem apenas que ele não é um polígono convexo.

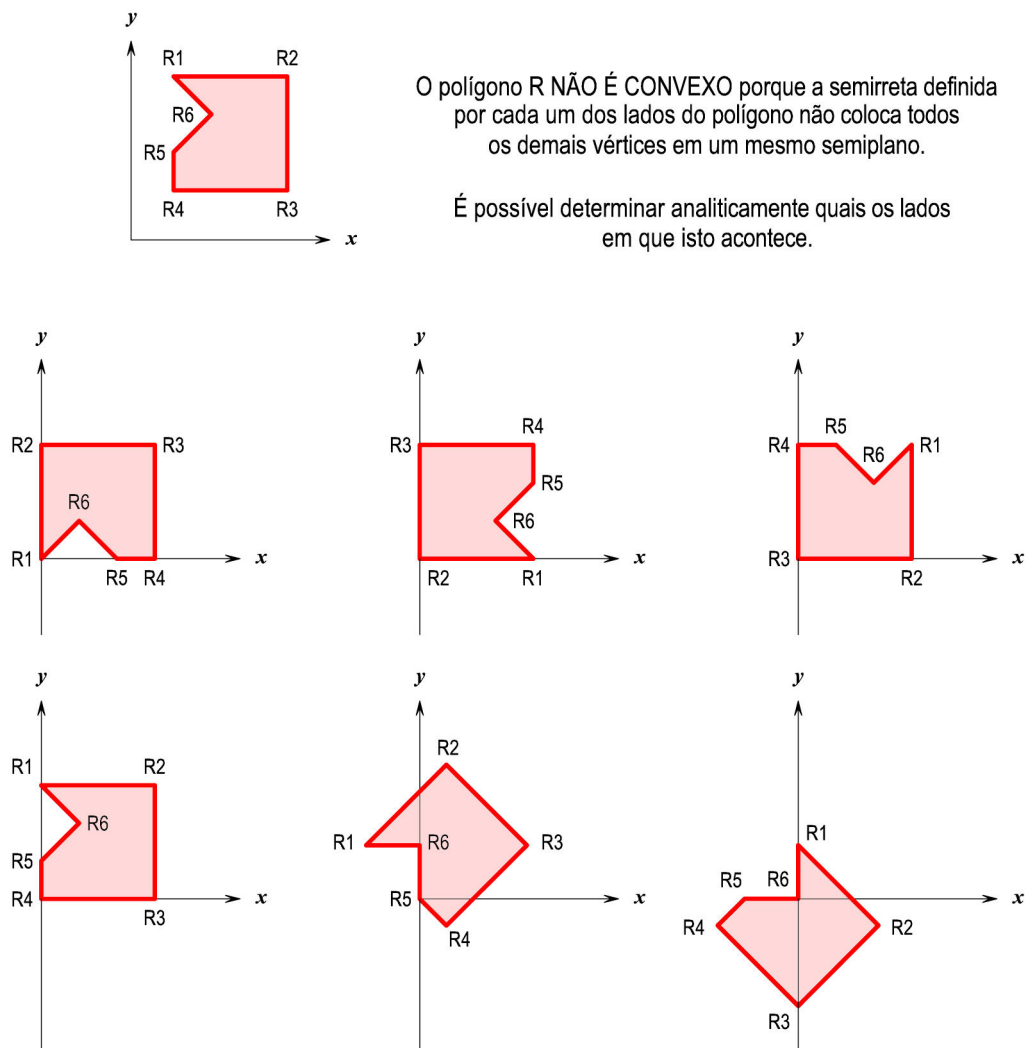


FIGURA 2.28 – TESTE DE CONVEXIDADE EM UM POLÍGONO (RESULTADO NEGATIVO)  
FONTE: Autor (2012)

<sup>12</sup> A função arco-tangente tradicional possui argumento único e sua imagem está limitada ao intervalo  $[-90^\circ + 90^\circ]$ . Além disto, eventuais divisões por zero em declarações como  $\text{atan}(x/y)$  são uma fonte comum de falha no processamento citado e em transformações da forma retangular para a polar.

Embora o polígono R seja, no caso, efetivamente simples e côncavo, este teste não garante esta condição. Porém, se outro teste – anterior ou posterior – puder garantir que o polígono é simples, então é possível garantir que o polígono é côncavo e, também, detectar os lados associados a esta condição.

#### 2.3.9.3 Teste analítico da condição de polígono simples ou complexo

Para determinar se um polígono é simples é necessário um teste exaustivo onde *todos os lados, combinados dois a dois*, são testados com o propósito de verificar se a interseção de lados não consecutivos é nula. Se isto acontece, o polígono atende à definição de polígono simples, na qual todas as interseções de dois lados não consecutivos são conjuntos vazios.

Por outro lado, uma única interseção de lados não consecutivos é condição necessária e suficiente para garantir que um polígono seja complexo.

As classificações de polígono simples e polígono complexo são mutuamente exclusivas. Por este motivo, se o tempo de processamento for crítico para uma aplicação, é mais conveniente testar gradualmente as possíveis combinações de lados não consecutivos à procura de uma interseção não nula porque, se ela(s) existir(em), basta a primeira ocorrência para garantir a condição de polígono complexo. Neste caso as combinações restantes tornam-se desnecessárias e o processo de teste pode ser interrompido sem problemas. Se ao final de todas as combinações possíveis isto não acontece, então exaurem-se as possibilidades e o polígono é simples.

Em um teste por exaustão baseado na definição de polígono simples o número de procedimentos necessários é uma função quadrática do número de lados. Em aplicações onde o tempo de processamento é crítico, algoritmos mais rápidos são comumente empregados. Para a detecção de uma ocorrência de interseção com interrupção do teste o algoritmo de Shamos-Hoey (1976) é uma opção eficiente. Para detectar o conjunto completo de intersecções, o algoritmo de Bentley-Ottmann (1979) – uma extensão do anterior – é uma opção popular nos



meios especializados por ser "relativamente simples tanto no seu entendimento quanto na implementação" (SUNDAY, 2012). O conjunto das intersecções é útil, por exemplo, em aplicações onde convém dividir um polígono complexo em uma série de polígonos simples.

## 2.4 VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS, VEÍCULOS AUTÔNOMOS E ROBÔS

### 2.4.1 Definições usadas neste trabalho

As expressões veículos não tripulados e veículos autônomos tem sido amplamente utilizadas em diversas áreas mas com significados variados. Tal fato decorre, entre outros motivos, pela multidisciplinaridade do tema e pelo amplo espectro de possíveis aplicações. Robôs são objetos de estudos e de pesquisas em Inteligência Artificial, Ciência da Computação, Matemática, Engenharias. São, inclusive, motivo de aproximação entre diversas áreas de conhecimento e colaboraram para tornar mais difusas as suas delimitações.

No escopo deste trabalho, estas expressões terão o seguinte significado:

- Veículo não tripulado / *unmanned vehicle* (VNT/UV) é um termo genérico para descrever um veículo operado sem a presença física de uma tripulação a bordo.
- Veículo autônomo é outro termo igualmente genérico que pode ser usado para descrever um veículo capaz de realizar completamente um determinado conjunto de tarefas sem intervenção de um operador humano.

O grau de autonomia de um veículo é uma medida de sua capacidade em realizar determinadas tarefas sem a intervenção de operadores humanos.

Embora a maioria dos veículos autônomos seja formada por veículos não tripulados, estas expressões são independentes. Por exemplo, os veículos aéreos, terrestres e aquáticos comumente usados por modelistas em atividades de lazer são

veículos não tripulados e sem qualquer autonomia. As decisões sobre a movimentação e a atuação dos veículos ficam totalmente a cargo de operadores humanos posicionados remotamente e que, em geral, analisam a situação visualmente e controlam as tarefas por meio de sistemas de comunicação e de protocolos adequados.

Por contraste e por exemplo, existem veículos tripulados totalmente autônomos – caso dos veículos usados por alguns aeroportos para transportar passageiros entre portões localizados em prédios diferentes.

Os veículos não tripulados podem ser classificados por diferentes critérios: grau de autonomia, ambientes em que atuam, natureza das tarefas envolvidas, graus de mobilidade, capacidades de transporte de cargas etc. A figura 2.29 ilustra diversos veículos deste tipo e cada veículo nela representado poderia ser classificado segundo estes diferentes critérios.

Por exemplo, na figura 2.29 há dois veículos terrestres não tripulados usados apenas para reconhecimento e também um VTNT de reconhecimento, mas provido de armamento portátil que lhe confere alguma capacidade de combate.

Uma parcela significativa dos veículos não tripulados pode ser considerada como robôs. Segundo Latombe (1991), “Um robô é um dispositivo mecânico versátil – por exemplo, um braço manipulador, uma mão multidedos multijuntas, um veículo com rodas ou pernas, uma plataforma de voo livre, ou uma combinação destes – equipado com sensores e atuadores sob o controle de um sistema computacional. Ele opera dentro de um espaço de trabalho dentro do mundo real. Este espaço é povoado por objetos físicos e é sujeito às leis da natureza. O robô executa as tarefas pela execução de movimentos no espaço de trabalho.”

GLADIATOR 240G



Fonte: [www.redstone.army.mil](http://www.redstone.army.mil), 2010

Thales Micro Trooper Unmanned Ground Vehicle (UGV)



Fonte: [www.defense-update.com](http://www.defense-update.com), 2010

Small Unmanned Ground Vehicle Demonstration



Fonte: Eric Draper / New York Times, 2010

PROTECTOR - Unmanned Surface Vehicle (USV)



Fonte: <http://amansworldonline.com>, 2010

Saab Double Eagle - Underwater Unmanned Vehicle (UUV)



<http://www.defenseindustrydaily.com>, 2010

FIGURA 2.29 – EXEMPLOS DE VEICULOS NÃO TRIPULADOS

FONTE: Indicada caso a caso sob a respectiva fotografias.

A definição anterior é suficientemente ampla para incluir tanto robôs fixos quanto robôs móveis. Por exemplo, a maioria dos robôs de uso industrial são robôs fixos e o mesmo conceito se aplica a uma estação total robotizada montada sobre um dispositivo de centragem forçada fixado a um pilar ou montada sobre um tripé.

Com respeito à autonomia, Latombe (1991) cita que “Um dos objetivos derradeiros em Robótica é criar robôs autônomos. Tais robôs irão aceitar tarefas descritas em alto nível e irão executá-las sem interferência humana posterior. As descrições de entrada serão o que o usuário deseja que seja feito ao invés de como fazer isto. O robô será qualquer tipo de dispositivo mecânico versátil equipado com atuadores e sensores sob o controle de um sistema computacional.”

Um exemplo de tarefa autônoma que pode ser especificada em alto nível é o deslocamento de um robô móvel entre duas posições de uma instalação industrial. Outro exemplo relacionado a um robô móvel seria a geração *in loco* de um modelo digital de terreno de uma área delimitada por uma poligonal fechada. A primeira tarefa é comparativamente mais simples porque opera tipicamente em ambientes internos e estruturados (ROMANO, 2002). Por outro lado, a segunda tarefa acontece em ambientes externos e, a princípio, seria “substancialmente mais complexa devido à falta de feições ou de estruturas bem definidas no meio natural” (DURRANT-WHYTE, 2001).

#### 2.4.2 Alguns dados históricos sobre veículos não tripulados

Historicamente o desenvolvimento de veículos não tripulados / *unmanned vehicles* (VNTs/UVs) para operações no ar, no mar e na terra foi motivado por questões de Defesa, sendo notável a partir de meados da década de 1950. Newcome (2004), em seu livro sobre aviação não tripulada, apresenta um registro cronológico da nomenclatura aplicada a este tipo de veículo (ver figura 2.30) e menciona que a expressão *unmanned aerial vehicle* / veículo aéreo não tripulado (UAV/VANT) data do início da década de 1990.

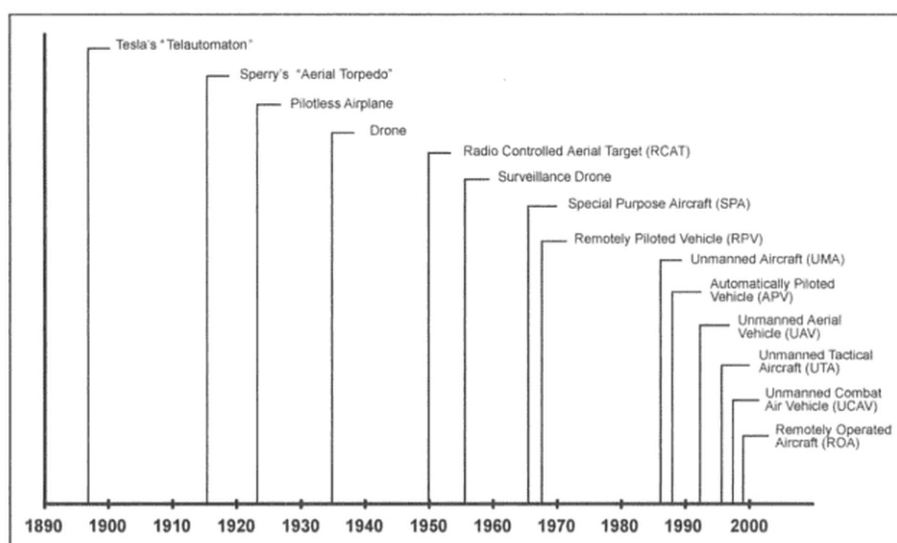


FIGURA 2.30 – CRONOLOGIA DE NOMES APLICADOS A VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS  
FONTE: NEWCOME, 2004

Newcome (2004) cita que em 1918 o Exército dos Estados Unidos assinou o primeiro contrato relacionado a aeronaves não tripuladas: produção de 25 modelos *Liberty Eagle* pela *Dayton Wright Airplane Company*. O registro histórico apresentado por este autor confirma a preponderância de experiências e aplicações com propósitos militares (figura 2.31).

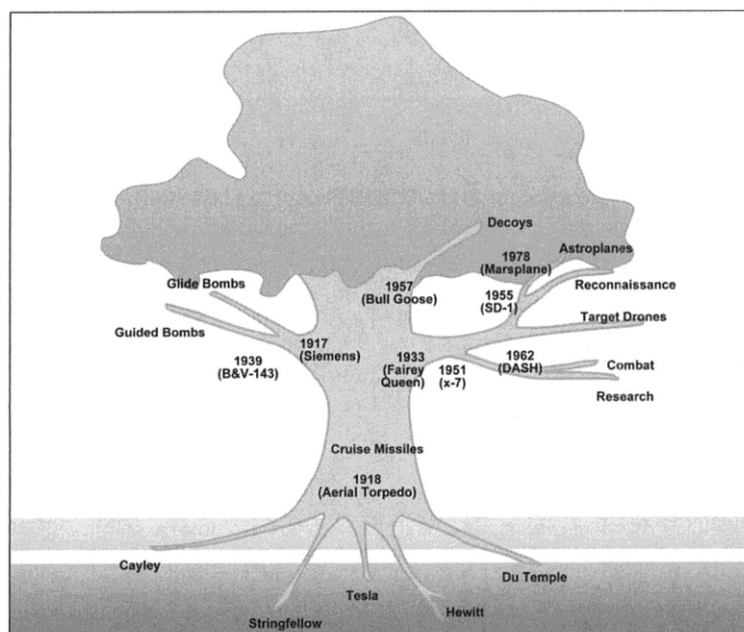


FIGURA 2.31 ÁRVORE GENEALÓGICA DOS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS  
FONTE: NEWCOME, 2004

VANTs foram utilizados, por exemplo, como alvos para treinamentos de defesa antiaérea e em algumas missões de combate da segunda guerra mundial. A partir de meados da década de 1950 observa-se que o foco das aplicações dos VANTs militares passa para missões de observação e reconhecimento em possíveis áreas hostis dos teatros de operações. Em 1955 aconteceu o primeiro voo de uma aeronave especificamente projetada para esta finalidade, o *Northrop SD-1 Falconer/Observer*, posteriormente utilizado em campo pelos exércitos estadunidense e britânico.

O sistema *NAVSTAR GPS* – desenvolvido, implementado e mantido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América – contribuiu significativamente para quase todos os programas de veículos não tripulados civis e militares.

Isto é particularmente verdade no caso dos veículos não tripulados aéreos e aquáticos de superfície, onde, na maioria das situações, o posicionamento provido pelo sistema *NAVSTAR GPS* não fica prejudicado por obstruções ou efeitos de multicaminhamento.

#### 2.4.3 Evolução dos VANTs no início do século XXI

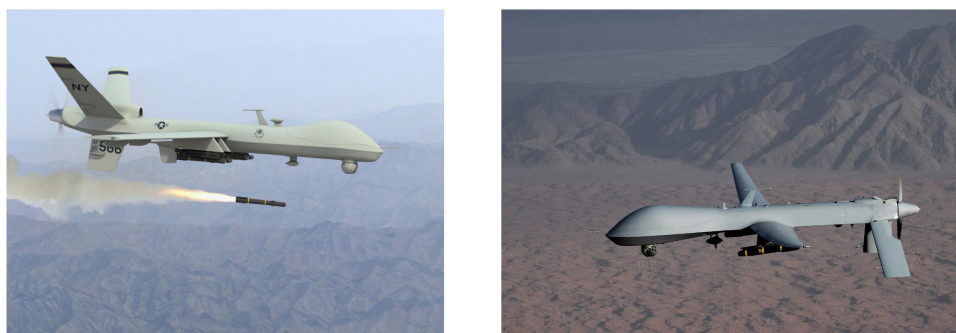


FIGURA 2.32 – VEÍCULO ÁEREO NÃO TRIPULADO DE COMBATE (UCAV)  
MODELO *PREDATOR* E MÍSSEL *HELLFIRE*  
FONTE: *USA DEPARTMENT OF DEFENSE* / DIVULGAÇÃO, 2001

Um fato marcante da aviação não tripulada foi, em 2001, o lançamento bem sucedido de mísseis *Hellfire* a partir do modelo conhecido como *Predator* (figura 2.32). A eficácia destas operações acelerou o uso e o desenvolvimento deste tipo de veículo como arma efetiva e, a partir de então, uma nova sigla entrou em uso para diferenciar e designar aeronaves não tripuladas projetadas especificamente para combate: UCAV – *Unmanned Combat Aerial Vehicle*. Posteriormente a palavra inglesa *drone* (em português, zangão ou zumbido) se tornou de uso corrente em âmbito mundial para designar tanto este tipo de aeronave quanto as não-tripuladas de uso civil. Por exemplo, em março de 2013 foram publicadas reportagens sobre *drones* em dois dos maiores portais brasileiros na Internet – G1 e Terra – e na edição brasileira da revista *National Geographic*.

A reportagem publicada no portal Terra (GOMES, 2013) tratava apenas de *drones* militares e, mais especificamente, sobre seu uso em atividades anti-terrorismo. A da *National Geographic Brasil* (HORGAN, 2013) dava ênfase ao

massivo desenvolvimento da tecnologia a partir dos atentados terroristas de 11 de setembro de 2001 e às aplicações dos *drones* em espionagem e monitoramento.

A publicada no G1 (STOCHERO, 2013) menciona estes assuntos, mas foca sua atenção no cenário brasileiro. O "Levantamento inédito feito pelo G1 mostra [o] emprego civil e militar [dos *drones*] no Brasil", relata que mais de 200 aeronaves não tripuladas voam pelo país em atividades diversas sem que o uso deste tipo de equipamento esteja devidamente regulamentado, cita o Brasil como "um centro emergente de pesquisa, fabricação e utilização de *drones*" e relata que:

Apesar de pouco conhecidos e discutidos, os drones são realidade em vários setores do país, sendo usados nas áreas de energia, mineração, agricultura, rodovias e construção civil, além de ajudar no trabalho de órgãos policiais, ambientais e de defesa civil. Centros de pesquisa e desenvolvimento de projetos, montados em universidades com financiamentos do governo e da iniciativa privada, trabalham na construção de VANTs dos mais variados tamanhos, formas e serventias. Outros modelos são importados de países que já usam drones há mais tempo.

A reportagem cita também exemplos da experiência brasileira com *drones* em treinamentos de defesa anti-aérea, segurança, inteligência, monitoramento de desastres, inspeção de linhas de transmissão e oleodutos, mapeamento expedito em situações de emergência e outros.

#### 2.4.4 Siglas relacionadas a veículos não tripulados

Nas áreas de conhecimento relacionadas aos veículos não tripulados, observa-se atualmente uma tendência ao uso de um menor número de siglas mais genéricas. Por exemplo, nos veículos terrestres não tripulados são usuais as seguintes siglas:

- UGV            *Unmanned Ground Vehicle;*
- AGV           *Autonomous Ground Vehicle;*
- ACGV        *Autonomous Combat Ground Vehicle;*
- TUGV        *Tactical Unmanned Ground Vehicle.*

No caso de veículos não tripulados aquáticos, as duas siglas mais comumente empregadas em inglês diferenciam veículos que operam na superfície e veículos submersíveis – mas, diferentemente do que acontece com os veículos aéreos e terrestres, não fazem distinção entre os veículos de combate e os veículos de serviço, inspeção e de outras aplicações:

- USV *Unmanned Surface Vehicle*;
- UUV *Unmanned Underwater Vehicle*.

No caso das siglas mais genéricas, no inglês a distinção volta a ser comum:

- UV *Unmanned Vehicle*;
- UCV *Unmanned Combat Vehicle*.

Atualmente, no Brasil, a única sigla em português que aparenta ser de uso corrente é VANT, usada para descrever genericamente veículos aéreos não tripulados e antecede a expressão *drone*<sup>13</sup>, popularizada pela mídia.

A sigla VTNT, significando veículo terrestre não tripulado, é uma sigla semelhante, mas não é de uso corrente. Não obstante, é adequada ao contexto deste trabalho e será doravante nele empregada.

#### 2.4.5 Veículos terrestres não tripulados

De modo geral, as possibilidades de manobra e de movimentação de veículos aéreos e de veículos aquáticos não tripulados (de superfície ou submersíveis) são maiores que as de veículos terrestres, os quais podem sofrer restrições de circulação relativamente maiores devido à existência de obstáculos que lhes sejam intransponíveis e/ou de áreas que lhes sejam inacessíveis.

---

<sup>13</sup> Originalmente *drone* (zangão ou zumbido) é uma gíria de origem militar que, à semelhança de expressões como "fogo amigo", acabou sendo adotada – e popularizada – pelos meios de comunicação de massa.



As capacidades de movimentação de veículos terrestres envolvem diversos fatores: a geometria básica do veículo, a motorização, tipo de tração etc. Veículos com múltiplas rodas tracionadas (4x4, 6x6, 8x8 etc.) e veículos com esteiras são as referências mais comuns. O tamanho, capacidade de carga, autonomia e capacidade de movimentação variam bastante e são usualmente descritas por parâmetros como raio mínimo de curvatura (também chamado de diâmetro mínimo de giro), ângulo de ataque, ângulo de saída, rampa máxima, inclinação lateral máxima, degrau máximo (GAIOTO, 2002) e, para os veículos de esteira, capacidade de transposição de fosso.

A aplicação e a autonomia energética são fatores determinantes do *design*. Por exemplo, na figura 2.33 observa-se um VTNT experimental de 6,5 toneladas, denominado *Crusher*, desenvolvido para alta mobilidade e velocidade no combate em terrenos acidentados.



FIGURA 2.33 – *CRUSHER*: VEÍCULO TERRESTRE NÃO TRIPULADO PARA COMBATE EM TERRENOS ACIDENTADOS

FONTE: NATIONAL ROBOTICS ENGINEERING CENTER /  
CARNEGIE MELLON UNIVERSITY, 2010

NOTA: Imagens disponíveis em: <<http://www.rec.ri.cmu.edu/projects/crusher/photos>>.  
Consulta em: outubro de 2010.

Na figura 2.34 está o veículo batizado de Zoe, de 198 kg e movido a energia solar captada por 2,4m<sup>2</sup> de painéis solares. Este último veículo foi empregado para levantamentos e mapeamento autônomo na investigação robótica de vida no deserto do Atacama, visando o emprego em futuras missões no planeta Marte.



FIGURA 2.34 – ZOE: VEÍCULO TERRESTRE NÃO TRIPULADO SOBRE RODAS PARA EXPLORAÇÃO ROBÓTICA DE VIDA NO DESERTO DO ATACAMA  
FONTE: Carnegie Mellon University (2006),  
NASA Ames Research Center (2005).

Tanto o Chusher quanto o Zoe foram desenvolvidos no Carnegie Mellon University's National Robotics Engineering Center (NREC), em parceria com instituições governamentais militares e civis dos Estados Unidos da América.

A figura 2.35 mostra robôs móveis com estruturas *hexapod*. Estas geometrias funcionais biologicamente inspiradas<sup>14</sup> podem proporcionar diversas capacidades de movimentação e, a princípio, sua versatiliade é favorável a deslocamentos em terrenos irregulares.

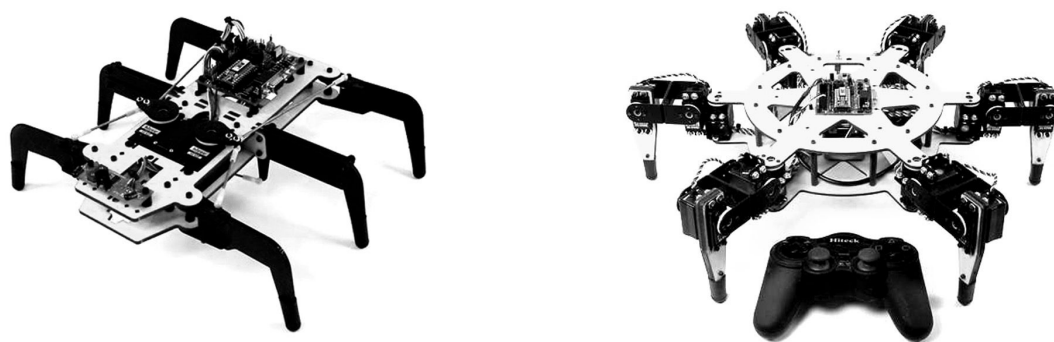


FIGURA – 2.35 ROBÔS COM ESTRUTURAS HEXAPOD DE  
SIMETRIA AXIAL E DE SIMETRIA RADIAL  
FONTE: [www.servomagazine.com](http://www.servomagazine.com) (2009) e [www.bg-cnc.com](http://www.bg-cnc.com) (2009)

Como três das pernas do robô devidamente apoiadas definem um plano e podem proporcionar estabilidade à plataforma, as demais podem ser reposicionadas para movimentá-lo ou, dependendo dos graus de liberdade incorporados aos mecanismos, atuar como manipuladores. A estrutura com simetria radial (também denominada, em inglês, de *crab robot*) é mais favorável à diversidade de funções e à movimentação omnidirecional.

Porém, cabe comentar que tanto a construção quanto a adaptação deste tipo de robô móvel para uma aplicação específica são comparativamente mais difíceis e que maioria dos trabalhos a eles relacionados pode ser classificada como pesquisa.

Independentemente da natureza do VTNT a ser empregado, para a execução dos levantamentos pretendidos, é importante a determinação de posição do veículo de forma tridimensional. Um sistema de posicionamento eficiente é importante para quaisquer aplicações envolvendo topografia e, no desenvolvimento de um robô

---

<sup>14</sup> Em insetos, aranhas e caranguejos.

móvel inteligente, um sistema de navegação que possa prover um algoritmo de planejamento de trajetória efetivo e eficiente é um elemento muito importante (KIM, RUSSEL, KOO, 2003).

#### 2.4.6 Composição genérica de veículos terrestres autônomos

Na figura 2.36 encontra-se um diagrama em blocos genérico que ilustra as diferentes relações funcionais entre os componentes de um sistema de veículo autônomo terrestre.

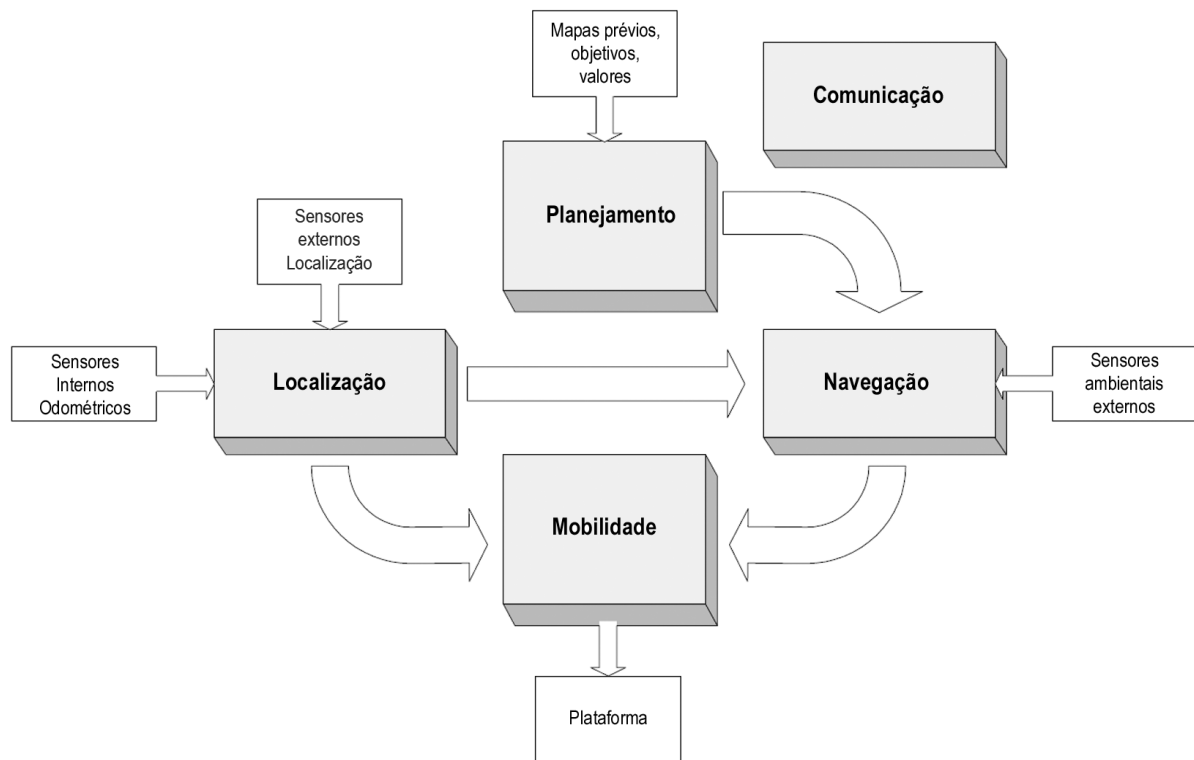


FIGURA 2.36 – DIAGRAMA EM BLOCOS  
DE UM SISTEMA DE VEÍCULO AUTÔNOMO TERRESTRE  
FONTE: DURRANT-WHYTE (2001)  
NOTA: Tradução nossa.

Durant-White (2001) representa e descreve estes blocos da seguinte maneira:

**Mobilidade** envolve a parte física da mecânica do veículo, a interação do veículo com o terreno e do controle do veículo sobre o terreno. A mobilidade é vista simplesmente com o efeito do sistema global, o resultado observável do sistema como um todo.

Determinação de posição ou **localização** provê estimativas de localização, atitude, velocidade e aceleração do veículo. Importantemente, do ponto de vista do restante do sistema, localização é uma função somente de saída. Isto significa que o desenvolvimento de uma habilidade de localização pode muitas vezes prosseguir independentemente daquelas dos outros componentes do sistema.

Navegação no sentido menor, ou simplesmente **navegação**, está relacionada com a aquisição de, e resposta a, informação externa sensoriada. A função de navegação toma entradas de sensores que observam o ambiente operacional. Ele deve usar esta informação para criar uma representação interna do ambiente que possa ser subsequentemente usada na execução da missão.

Navegação no sentido amplo, ou **planejamento de missão e tarefas**, funcionalmente gera trajetórias, comportamentos ou pontos de passagem para o sistema como um todo. Ele não tem ligação direta nem com os sensores de entrada e nem com os controladores de saída. Contudo, ele claramente deve usar um entendimento dos mesmos, em conjunção com mapas prévios e objetivos definidos da missão, para produzir comandos apropriados de navegação.

**Comunicação** provê a ligação entre o veículo e quaisquer elementos restantes do sistema global, inclusive outros veículos e operadores. Não há razão para supor que um ALV verdadeiramente autônomo não deva compartilhar o mesmo meio de comunicação com outros sistemas e ser realmente interoperável com mais plataformas convencionais.

(DURRANT-WHYTE, 2001, tradução nossa)

Ao longo de seu relatório o mesmo autor menciona que “A necessidade por mobilidade, localização, navegação e habilidades de planejamento permanecem independentemente do tipo de missão” e que “O mapa funcional das capacidades de um ALV é suficiente para definir com precisão a tecnologia requerida para implantar e operacionalizar o sistema. Descrições de arquiteturas específicas são consideradas irrelevantes<sup>15</sup> e até mesmo enganadoras no entendimento da relação entre as áreas de tecnologia e capacidades operacionais. Consequentemente elas não são discutidas posteriormente<sup>16</sup>.”

---

<sup>15</sup> Irrelevantes para os propósitos do relatório original.

<sup>16</sup> No relatório original.

Com relação à definição dos requisitos de um veículo autônomo terrestre, o autor inicia sua exposição da seguinte forma:

Um fato que é claro, a partir da literatura de pesquisa e dos programas prévios de ALVs (*Autonomous Land Vehicles*) é que há necessidade de haver uma definição precisa e finita dos requisitos da missão para que um sistema seja desenvolvido.

É essencialmente impossível desenvolver uma “máquina autônoma” genérica para todas as missões possíveis com ALVs. Embora possa parecer óbvio, demasiados programas de ALVs tem visado idéias muito nebulosas de operações “inteligentes e autônomas”, criando uma exigência impossível de lidar como todos tipos de terreno e situações de missão de um maneira autônoma. Em contraste, um objetivo final bem definido, com tipos específicos de missão e condições específicas de terreno, imediatamente torna tratável o problema de desenvolvimento de autonomia.

....

Existem diversas abordagens viáveis no projeto de uma plataforma ALV. A abordagem óbvia é a adaptação de uma plataforma existente, que aproveita um conhecimento substancial previamente incorporado a um veículo operado por um condutor. Contudo, uma restrição-chave, que o condutor do veículo deve ser mantido em razoável conforto, não existe em um veículo autônomo. E isto abre uma variedade potencialmente grande de opções de projeto para a obtenção de um veículo mais compacto e que empregue mecanismos de mobilidade completamente diferentes.

(DURRANT-WHYTE, 2001, tradução nossa)

Relativamente aos requisitos de projeto na questão da mobilidade, Durrant-Whyte (2001) coloca que esta questão tem sido considerada em dois níveis:

1. A escolha de uma metodologia de locomoção, incluída a escolha de rodas, esteiras, pernas ou aletas como mecanismo de propulsão.
2. A otimização de um método específico de propulsão – por exemplo, a escolha do tamanho, número e esforço trator de uma plataforma.

Relativamente ao controle de mobilidade, Latombe (1991) comenta que “Em Robótica, há distinção entre o controle de mobilidade do veículo e o planejamento de trajetória. A abordagem normal para o controle de mobilidade é assumir uma trajetória específica e então controlar o veículo para seguir esta trajetória. A trajetória em si é normalmente especificada através de uma série de pontos de passagem (*waypoints*) ligados por linhas retas ou, alternativamente, *splines* suaves unindo pontos de passagem.” Durrant-Whyte (2001) comenta que “É importante observar que os tipos de modelos usados para condução e para controle de problemas devem ser preditivos...”

## 2.5 SOBRE SISTEMAS DE TRAÇÃO E DIREÇÃO EM VEÍCULOS TERRESTRES SOBRE RODAS

Qualquer automóvel é composto por diversos sistemas que, devidamente reunidos, realizam a tarefa de proporcionar o movimento comandado por seu condutor. Na ampla maioria das aplicações ele é um operador humano operando em ambientes estruturados, mas também pode ser um sistema autônomo ou semi-autônomo operando em ambientes estruturados ou não. Um veículo autônomo operando em ambientes não estruturados é a combinação mais desafiadora.

Controlar o movimento de um veículo exige, necessariamente, controlar os sistemas de tração e direção. Um entendimento básico deste conjunto de soluções – e de suas variantes – é necessário para embasar o aproveitamento de uma plataforma existente para uso não tripulado e mesmo o desenvolvimento de outra dedicada a um tipo específico de missão.

### 2.5.1 Sobre a combinação geometria de Ackermann & diferencial traseiro

O arranjo funcional predominante nos veículos automotores de quatro rodas fabricados desde o início do século XX foi o de veículos com tração nas rodas traseiras e sistema de direção nas rodas dianteiras (figura 2.37). A alteração deste padrão nos veículos produzidos em massa começa a ser notável somente a partir de



meados dos anos 1970, com a introdução de diversos modelos de veículos de passeio com tração dianteira. Porém os sistemas de direção dianteira baseados na *geometria de Ackermann*<sup>17</sup> se mantiveram hegemônicos – na verdade quase onipresentes – em todos os veículos de quatro rodas, sejam eles de tração dianteira, traseira ou integral.

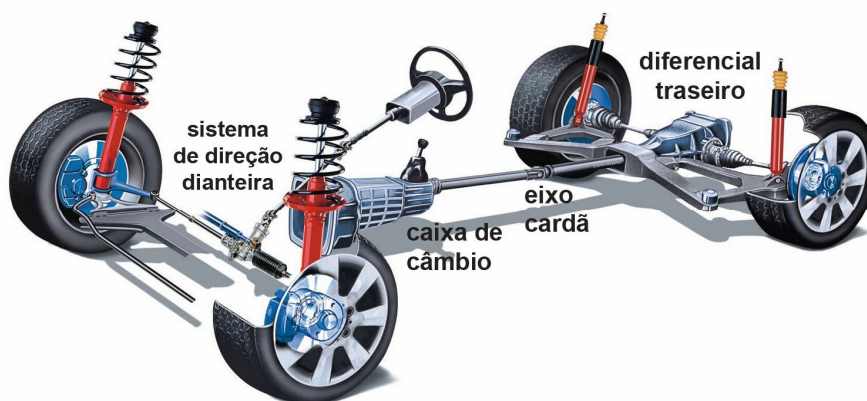


FIGURA 2.37 – TRAÇÃO TRASEIRA E SISTEMA DE DIREÇÃO DIANTEIRA  
FONTE: BLOG AUTO CONCEITOS (2011)

NOTA: Nomenclatura acrescentada. Imagem disponível em:  
<[http://autosconceitos.blogspot.com.br/2011\\_12\\_01\\_archive.html](http://autosconceitos.blogspot.com.br/2011_12_01_archive.html)>.  
Acesso em 13-nov-2012.

O arranjo tração traseira e direção dianteira resultou da combinação de duas soluções mecânicas independentes:

1. O diferencial mecânico aberto para o sistema de tração;
2. A geometria de Ackermann para o sistema de direção.

<sup>17</sup> Foge ao escopo deste trabalho um relato histórico detalhado sobre a geometria de Ackermann, mas cabe comentar que, apesar de seu nome, a clássica solução baseada num trapézio isóceles articulado e com dois pivôs foi desenvolvida pelo médico inglês Erasmus Darwin em 1765 e que o registro de sua patente em 1818 foi feito por Rudolph Ackermann, na condição de agente do fabricante alemão de carruagens Georg Lankensperger (KING-HELE, 2002). Repatenteado em 1893 na Alemanha, por Carl Benz, "Esta patente – DRP 73515 – assumiu imediatamente significância mundial e muito compreensivelmente deflagrou uma enxurrada de novos *designs* e conversões de veículos já existentes" (HODZIC, 2008).



Em comum pode-se dizer que são soluções que, sob condições normais de aderência entre as bandas de rodagem dos pneus e o piso, evitam o arrasto das rodas em diversas situações – notadamente nos movimentos em curva. A figura 2.38 ilustra este arranjo. Para sua compreensão, é importante observar que:

- Todas as quatro rodas estão alinhadas com o Centro Instantâneo de Giro do veículo (CIG);
- As rodas traseiras (no caso, responsáveis pela tração) possuem direções fixas e paralelas entre si, mas a roda da parte externa da curva gira mais rapidamente que a roda da parte interna;
- As rodas dianteiras (responsáveis pela direção) esterçam em ângulos diferentes e a roda interna esterça mais do que a roda externa;
- O CIG deve seguir o alinhamento do eixo traseiro e das suas rodas, mas sua posição depende dos ângulos de giro das rodas dianteiras.

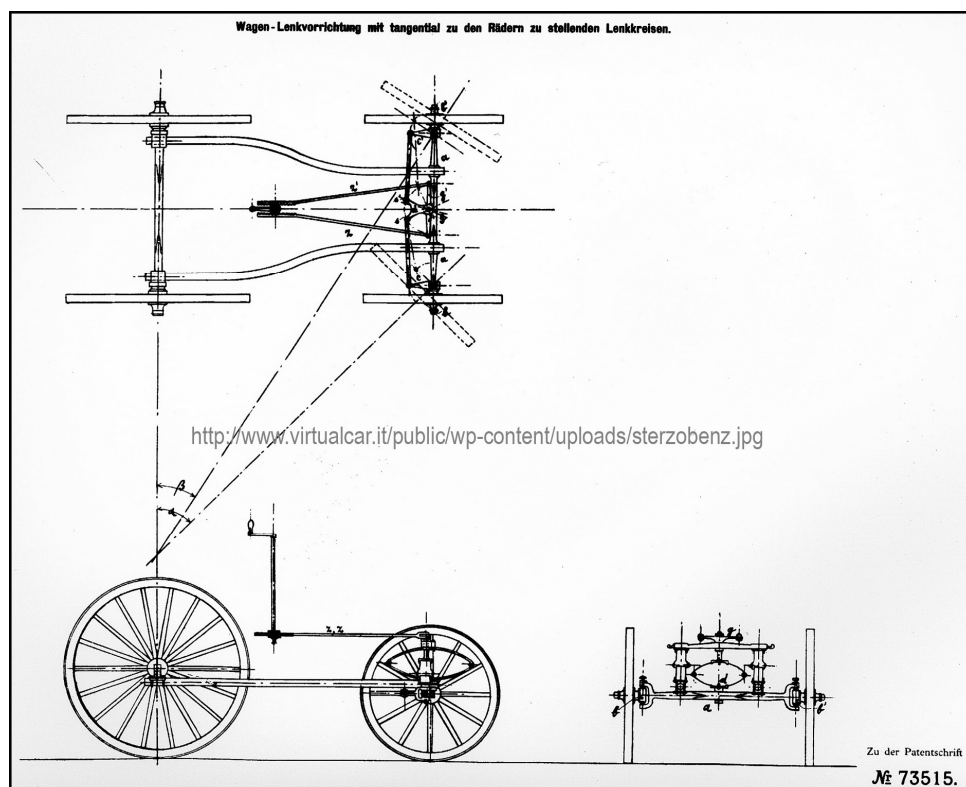


FIGURA 2.38 – GEOMETRIA DE ACKERMANN, REPATENTEADA POR CARL BENZ EM 1893.

FONTE: BENZ (1893).

NOTA: Imagem disponível em <<http://www.virtualcar.it/public/wp-content/upload/sterzobenz.jpg>>.

Consulta em 06-nov-2012.

Neste arranjo cada uma das quatro rodas possui um raio diferente de giro (que, salvo coincidências momentâneas, também são diferentes do raio de giro do centro geométrico do veículo) e, também, uma velocidade tangencial diferente. Em condições normais de condução (ou seja, sem arrastos, escorregamentos ou situações afins) as diferentes velocidades das rodas dianteiras são uma consequência natural do movimento em curva do veículo. Porém, o tracionamento das rodas traseiras em velocidades diferentes e exatamente na proporção necessária à curva envolve um dispositivo mecânico dedicado e de uso específico: o diferencial (classicamente o diferencial mecânico aberto, mostrado na figura 2.39). Este dispositivo lida automaticamente com a diferença de velocidade nas rodas tratoras e sua própria designação – diferencial – é alusiva a esta função.

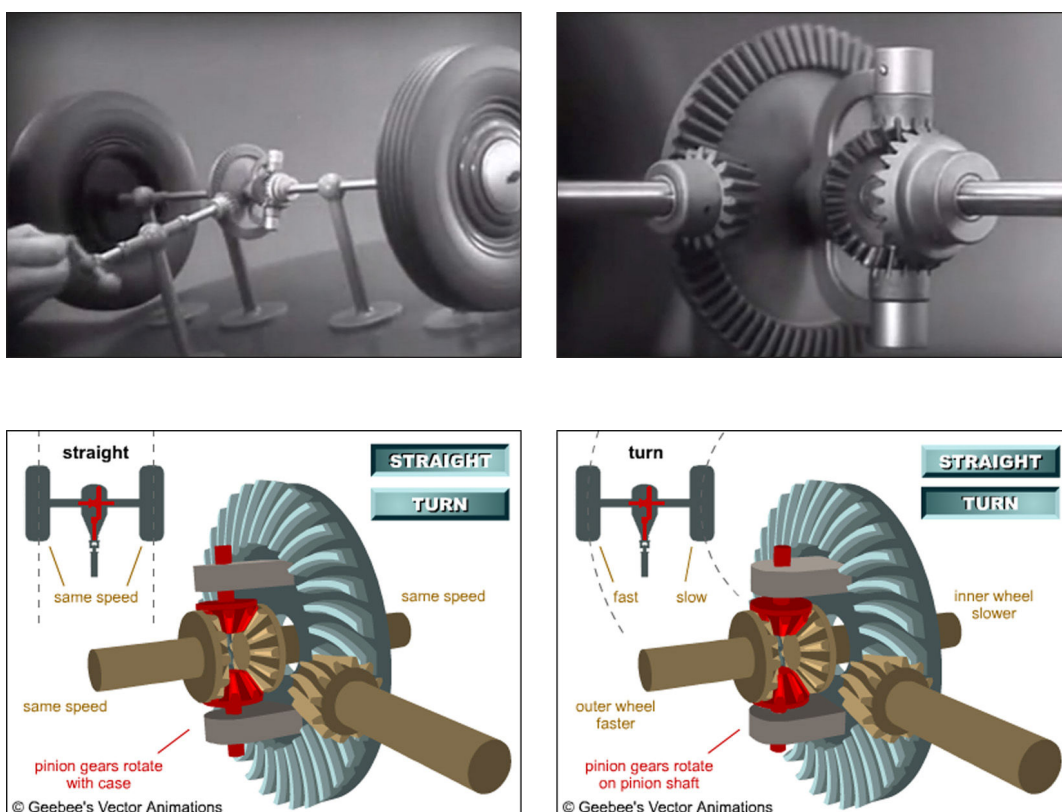


FIGURA 2.39 – TELAS ILUSTRATIVAS DO FUNCIONAMENTO DE DIFERENCIAIS ABERTOS

FONTE: AROUND THE CORNER (1930) & GEEBEE'S VECTOR ANIMATION

NOTA: Videos disponíveis em <<http://www.youtube.com/watch?v=K4JhruinbWc>> e <<http://www.howstuffworks.com/differential2.htm>>.

Consulta em 06-nov-2012.

Num linguajar matemático pode-se dizer que, em condições normais, é a trajetória do veículo que impõe as "condições de contorno" para:

- O funcionamento do diferencial e as diferentes velocidades tangenciais das rodas traseiras (sistema de tração);
- Os diferentes ângulos de giro das rodas dianteiras (sistema de direção) e as diferentes velocidades tangenciais das rodas traseiras.

Foge ao escopo deste trabalho descrever em detalhes a construção e o funcionamento interno de um diferencial, mas cabe registrar que entender o seu funcionamento através de filmes, vídeos e animações (AROUND THE CORNER, 1930) é, em geral, comparativamente mais simples e proveitoso do que fazê-lo através de textos ilustrados.

A geometria construtiva do diferencial mecânico aberto é funcional na maiorias das situações, mas possui uma limitação inerente: quando uma das rodas perde a capacidade de tração (por estar suspensa em relação ao solo, por falta de atrito suficiente decorrente de piso enlameado, recoberto de óleo, areia etc.) e gira em falso, o diferencial cessa a transmissão de movimento para a outra roda e o veículo pode ficar imobilizado.

### 2.5.2 Sobre tração 4x4

A tração 4x4 melhora a distribuição dos esforços entre as rodas e torna a perda da capacidade de tração uma ocorrência menos provável. Quando comparado a um veículo semelhante com tração apenas dianteira ou traseira, um veículo 4x4 é mais estável em curvas, em estradas não pavimentadas, pisos irregulares, pisos molhados, com neve etc. Situações como as duas últimas e a primeira são motivo de sua utilização em alguns modelos de veículos de passeio, mas, em geral, o uso de veículos 4x4 se justifica por necessidades operacionais em vias de acesso precário ou mesmo fora delas, em ambientes não estruturados.

A maioria dos veículos 4x4 combina a geometria de Ackermann com o uso de três diferenciais – traseiro, dianteiro e central (figura 2.40). O diferencial central, usualmente menos evidente por estar embutido na caixa de transmissão, se faz

necessário porque, notadamente nos movimentos em curva as velocidades angulares dos eixos-cardã dianteiro e traseiro são diferentes entre si, assim com são diferentes as velocidades tangenciais das 4 rodas. O diferencial central resolve mecanicamente a diferença entre os cardãs ao mesmo tempo em que os diferenciais traseiro e dianteiro resolvem a questão das diferenças entre as velocidades das rodas por eles tracionadas.

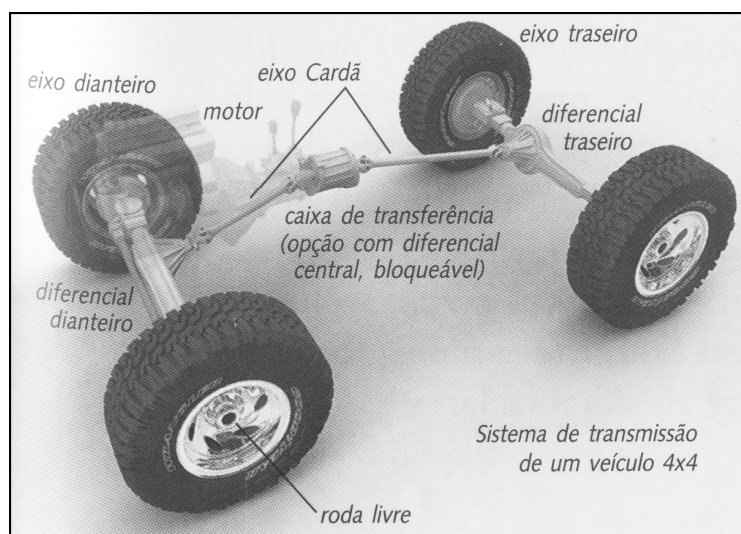


FIGURA 2.40 – TRIPLO DIFERENCIAL: A SOLUÇÃO CLÁSSICA PARA OS VEÍCULOS 4X4  
FONTE: GAIOTO (2002)

Num linguajar matemático, o uso de três diferenciais provê em tempo real uma solução para as condições de contorno do problema – as quatro velocidades tangenciais das rodas tratoras na ausência de escorregamento. Também é possível classificar a solução do triplo diferencial como mecanicamente recursiva, já um tipo de solução recorre a ela mesma para a solução de um problema completo.

Porém, a mesma limitação de tração com um único diferencial mecânico aberto pode acontecer no arranjo com três deles: quando uma das rodas perde a capacidade de tração e gira em falso, os diferenciais cessam a transmissão de movimento para as outras rodas e o veículo pode ficar imobilizado. A solução comumente incorporada ao veículo é o uso de diferenciais com escorregamento controlado ou de diferenciais com bloqueio (automático ou manual). Foge ao escopo deste trabalho uma discussão detalhada sobre direção *off-road* e cuidados no uso de recursos como o bloqueio dos diferenciais, guinchos e acessórios (que, usados

de forma inadequada, podem danificar o veículo e também colocar em risco seus ocupantes), mas comentários a respeito são citados por Friedmann (2009) e Gaioto (2002) explora o tema de forma exaustiva.

No que se refere a veículos autônomos, cabe comentar que sistemas de localização baseados apenas em sensores odométricos são, em geral, bastante afetados pelos eventuais escorregamentos das rodas. Isto acontece porque a(s) roda(s) sensoriada(s), ao girar em falso, continua(m) a enviar informações que, embora desvinculadas da realidade, são processadas pelo sistema para gerar uma estimativa de posição. O uso de algoritmos capazes de detectar escorregamento pode, em certos aspectos, diminuir quantitativamente os erros introduzidos, mas isto não corrige o problema e sem algum outro tipo de sensor externo de posição suficientemente confiável torna-se impossível determinar a localização atual, o que prejudica diretamente a navegação e a mobilidade do sistema (ver seção 2.4.6).

### 3 METODOLOGIA

O sistema desenvolvido para levantamentos autônomos neste trabalho está representado na figura 3.1. O sistema de posicionamento é constituído pela estação total robotizada (estacionada junto ao computador da Unidade de Controle Principal – UCP) e pelo prisma de reflexão total em 360° posicionado sobre o centro geométrico de um veículo desenvolvido para a realização de levantamentos topográficos cinemáticos. Devido à natureza específica do trabalho, e também devido à falta de um termo técnico usual para descrever este tipo de veículo, ele será doravante denominado de VLTC, significando *Veículo terrestre não tripulado para Levantamentos Topográficos Cinemáticos*. O diagrama de blocos do VLTC está na figura 3.2 e inclui os sinais de controle de controle dos motores de tração, dos servomotores de direção, comunicação e tensões de alimentação.

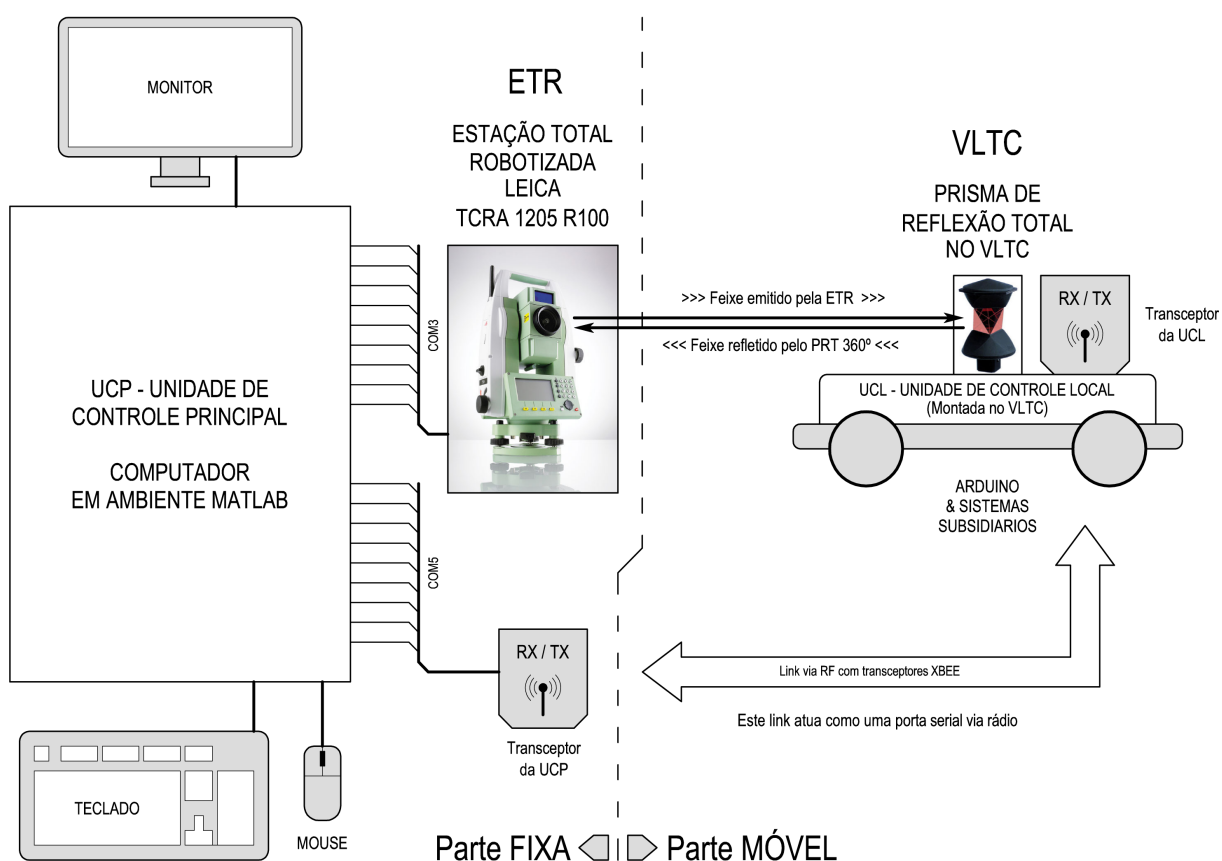


FIGURA 3.1 – COMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE LEVANTAMENTO  
FONTE: O autor (2013).

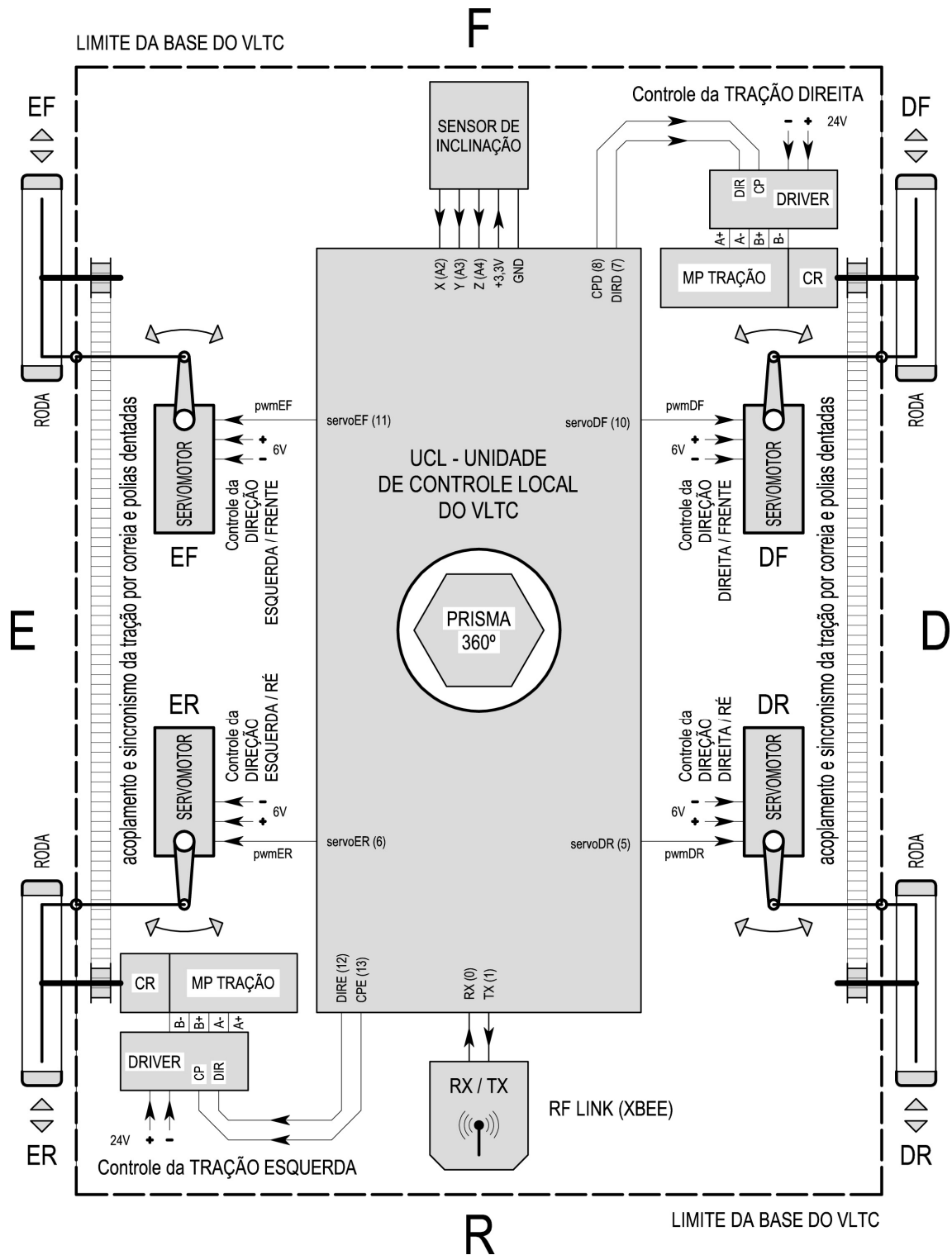


FIGURA 3.2 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO VLTC  
 FONTE: O autor.(2013).

A UCP opera em ambiente Matlab e gerencia o processo de levantamento que, em linhas gerais, é realizado pelo VLTC através de uma varredura no terreno para coletar pontos numa densidade pré-determinada. Para isto a UCP (1) controla a ETR através do protocolo GeoCOM/ASCII e (2) controla o VLTC por meio de funções de alto nível que, com auxílio da Unidade de Controle Local (UCL), geram os sinais de controle dos dois motores de passo de tração e dos quatro servomotores de direção do VLTC.

A plataforma do VLTC inclui um sensor de inclinação que, devidamente monitorado, informa sobre a necessidade de coletar pontos adicionais em função da magnitude das variações na inclinação do terreno.

A comunicação UCP-ETR acontece via porta de comunicação serial RS-232C. A comunicação UCP-UCL acontece através de um link de rádio-frequência via módulos XBEE que transmitem mensagens UCP-UCL e UCL-UCP num formato padronizado desenvolvido especificamente para este trabalho.

O sistema de coordenadas adotado para o trabalho é localmente estabelecido e os limites planimétricos da área a ser levantada são definidos através das coordenadas X e Y de um polígono.

### 3.1 SOBRE O CONTROLE DA ETR E SUA COMUNICAÇÃO COM A UCP

O controle da ETR por parte da UCP é feito em ambiente Matlab através de uma porta serial RS-232 (COM) e emprega comandos previstos no *protocolo GeoCOM/ASCII*.

#### 3.1.1 Sobre o protocolo GeoCOM

O protocolo GeoCOM é de formato proprietário da *Leica Geosystems* e é aplicável a uma série de instrumentos fabricados por esta empresa e denominados comercialmente de *FlexLine*. Nele "A comunicação acontece entre dois participantes



– um cliente e um servidor. O meio de comunicação é uma linha de comunicação serial." e "sua idéia é baseada no protocolo SUN Microsystems' Remote Procedure Call (RPC)." (LEICA, 2008, p. 5). A figura 3.3 ilustra a relação entre o cliente (no caso, a UCP, um computador em ambiente Matlab) e o servidor, que se encarrega de gerenciar o instrumento a fim de atender as requisições enviadas pelo cliente.

O protocolo GeoCOM "... oferece um alto nível de flexibilidade no desenvolvimento de software para comunicação com o instrumento [Leica TPS 1200], permitindo desta maneira qualquer número de aplicações customizadas (*off-board*) e configurações de hardware" (LEICA, 2006a, p. 2).

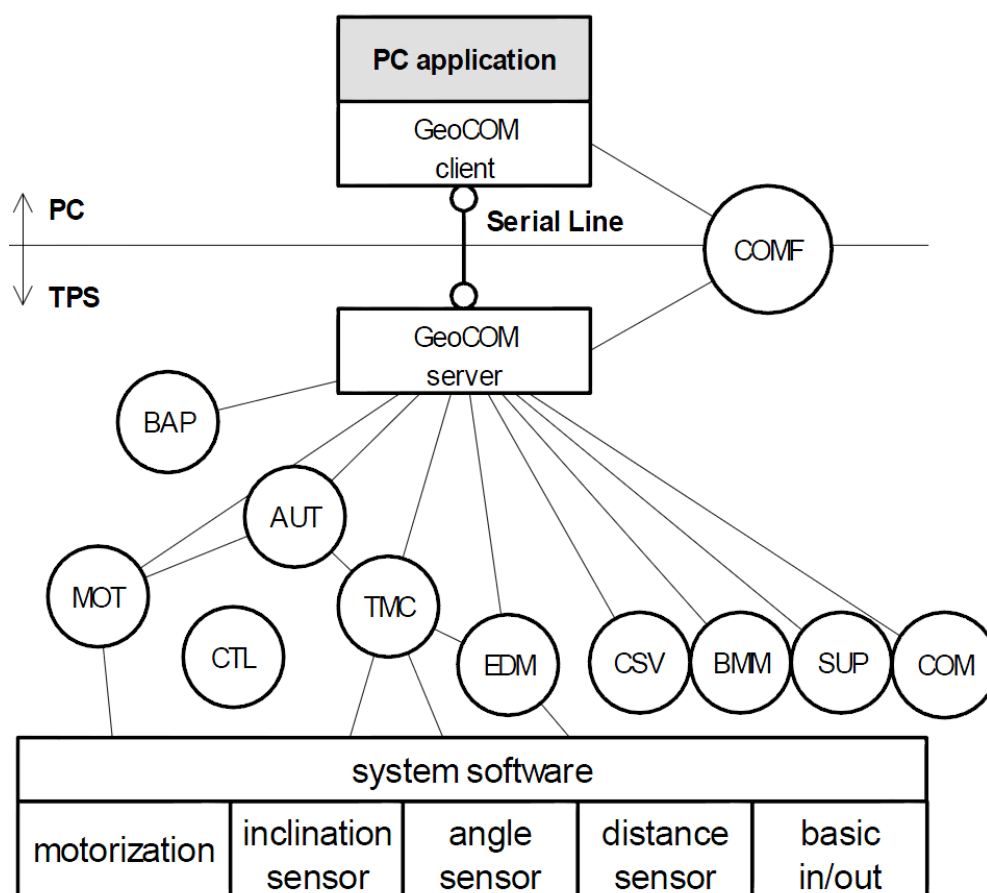


FIGURA 3.3 – GERENCIAMENTO DA ETR PELO GEOCOM  
FONTE; Leica Geosystems, 2006.

Por ser um protocolo de comunicação de dados entre dois equipamentos, o GeoCOM define o conjunto de regras e de procedimentos a serem respeitados para que seja possível, no caso deste trabalho, a comunicação entre uma estação total robotizada TCR 1205 R100 e um computador. Tanto o envio de comandos do computador para a estação quanto as correspondentes respostas retornadas são feitos através de *strings* de caracteres ASCII cujos formatos seguem regras de sintaxe determinadas por este protocolo de uso específico e aplicável a uma série de equipamentos fabricados *pela Leica Geosystems* e denominados comercialmente de *FlexLine*. Na página 2 do Leica TPS 1200 GeoCOM Getting Started Manual encontra-se uma descrição sucinta que, por sua relevância e abrangência, é transcrita e traduzida a seguir.

GeoCOM suporta três tipos de uso: um protocolo ASCII e dois com funções de alto nível em C++ e VBA. As seguintes explicações dizem respeito apenas ao protocolo ASCII.

#### Básico

Um comando GeoCOM sempre inicia com "%R1Q," seguido pelo número de identificação do comando (exemplo: 17017 para "medir distância & ângulo"). Depois do sinal de dois pontos seguem-se os parâmetros (para o comando 17017 – o "modo de distância" – por exemplo :2 para o programa de medida default). Note-se que na maior parte das vezes os parâmetros são definidos no começo do correspondente capítulo no manual do GeoCOM. Ao final CR/LF tem de ser enviada como uma string finalizadora. Para cada comando uma resposta ASCII é enviada pelo instrumento começando com "R1P," seguida por Códigos de Retorno e Parâmetros que dependem da requisição ASCII enviada.

#### Parâmetros de Comunicação

A fim de fazer a comunicação trabalhar corretamente, os parâmetros de comunicação do computador (ou *data logger*) e do instrumento devem ser alinhados e o modo GeoCOM no instrumento deve ser habilitado.

Na TPS 1200 ativa-se o modo GeoCOM habilitando-se a porta "GeoCOM mode" no painel CONFIGUREInterfaces. A fim de visualizar ou mudar as configurações de comunicação deve-se editar o dispositivo. As configurações *default* (dispositivo "RS232 GeoCOM" são:

BaudRate: 19200

Parity: None

Data Bits: 8

Stop Bit: 1

### Unidades

Em geral as unidades para distância são em metros e os valores angulares são sempre em radianos. Ajustes de unidades configurados no instrumento não tem qualquer influência no protocolo GeoCOM. As unidades de todos parâmetros usados por um determinado comando são especificadas na descrição dos comandos no manual do GeoCOM.

### Comandos Protegidos

Alguns comandos GeoCOM são protegidos por uma chave de licença. Se nenhuma chave de licença para a “GeoCOM Robotics Option” estiver carregada no instrumento todos os comandos GeoCOM iniciando com "AUT\_" não podem ser usados.

(Tradução nossa)

A estação total robotizada Leica TCR 1205 R100 empregada neste trabalho (número de série 1673662, data de fabricação 30-09-2004 e particularidades do fornecimento registradas no *website* da *Leica Geosystems*) foi adquirida 2005 através de um projeto de pesquisa envolvendo a UFPR, através do CPGCG, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Cabe citar que foi o primeiro instrumento deste tipo fornecido a uma universidade no Brasil e que inclui a opção de software e a chave de licença para operar no modo *GeoCOM Robotics License*. Além disto, o seu fornecimento incluiu também chave de licença para operar com os comandos protegidos, mas a realização deste trabalho não os empregou a fim de evitar eventuais limitações no uso de outras ETRs compatíveis com o protocolo GeoCOM mas desprovidas da correspondente licença para os comandos protegidos.

### 3.1.2 Grupos de comandos do protocolo GeoCOM

Os comandos do protocolo GeoCOM são divididos em cinco grupos:

1. Os comandos SET configuram os aspectos básicos da operação do instrumento. Cada um deles é formado por uma única string de caracteres que envia ao instrumento uma requisição associada a um parâmetro de configuração;

2. Os comandos CONF permitem verificar individualmente os parâmetros que definem a configuração atual do instrumento. Cada um deles também é formado por uma única string de caracteres. Em resposta a cada requisição o instrumento retorna uma string específica que informa sobre o parâmetro correspondente.
3. Os comandos PUT configuram o instrumento para operar num determinado sistema de coordenadas (o que, no SCL, é feito informando-se as coordenadas E, N, H e o ângulo horizontal correspondente à direção local de referência) e informam os demais parâmetros necessários à realização das medições (constante do prisma, altura do instrumento e altura do refletor);
4. Os comandos GET consultam o instrumento para obter informações sobre o instrumento, altura do instrumento, altura do refletor, características do prisma em uso, data/hora, correções etc. Também solicitam a realização de medidas, informações sobre os dados que a caracterizam e sobre os dados resultantes das mesmas
5. Os comandos *Telescope Positioning* controlam o posicionamento da luneta e a procura pelo prisma.

Tipicamente os comandos SET, CONF e PUT são usados apenas uma vez no início de um trabalho para configurar o modo de operação do instrumento e adequá-lo ao sistema de coordenadas e ao prisma em uso.

Os comandos GET são os que efetivamente coletam informações associadas ao trabalho em andamento e são usados tantas vezes quanto necessário. Estes comandos podem requisitar tanto as observações (distância inclinada, direção e ângulo vertical) quanto os resultados decorrentes (distância horizontal, desnível vertical e coordenadas do alvo). As informações de maior relevância dependem do contexto da aplicação. Por exemplo, as observações são os dados fundamentais no monitoramento de estruturas, mas nos sistemas de posicionamento (caso deste trabalho) as coordenadas resultantes para o alvo constituem uma informação de maior utilidade e maior facilidade de uso.

Os comandos *Telescope Positioning* são destinados a aplicações específicas que necessitam, por exemplo, efetuar o tombamento da luneta para trabalhar com Pontaria Direta e Pontaria Inversa (PD e PI) e, desta forma, minimizar a influência dos erros instrumentais.

### 3.1.3 Controle da ETR modelo TCR 1205 R100 através do Matlab

Na comunicação serial via RS-232C é necessário que os dois equipamentos envolvidos usem os mesmos parâmetros. Neste trabalho, a comunicação Matlab-ETR (Leica TCR 1205 R100) adotou os seguintes parâmetros (Leica Flexline GeoCOM Reference Manual, V1.30, p. 126):

- *BaudRate*: 9600 bps
- *Terminator*: CR/LF (default no GeoCOM)
- *Parity*: None (fixo no GeoCOM / não ser alterado)
- *Data Bits*: 8 (fixo no GeoCOM / não ser alterado)
- *Stop Bit*: 1 (fixo no GeoCOM / não ser alterado)

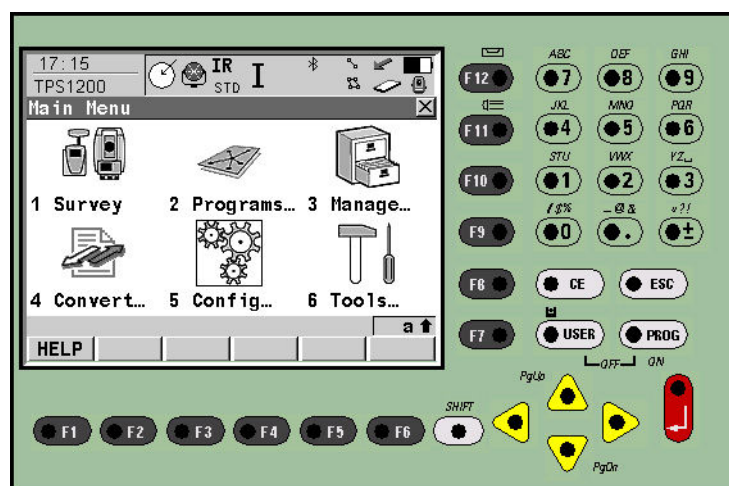


FIGURA 3.4 – TELA INICIAL DA ETR LEICA TCR 1205 R100  
FONTE: Modificado pelo autor (2013).

NOTA: As telas de operação da TCR 1205 R100 são iguais às do modelo TPS 1200. Para a geração desta figura e da anterior utilizou-se um emulador e menus da ETR fornecido pela *Leica Geosystems* para uso em treinamentos com a estação TPS 1200.

A tela inicial da ETR e o respectivo painel encontram-se representados na FIGURA 3.4. A seqüência das demais telas encontra-se na FIGURA 3.5;

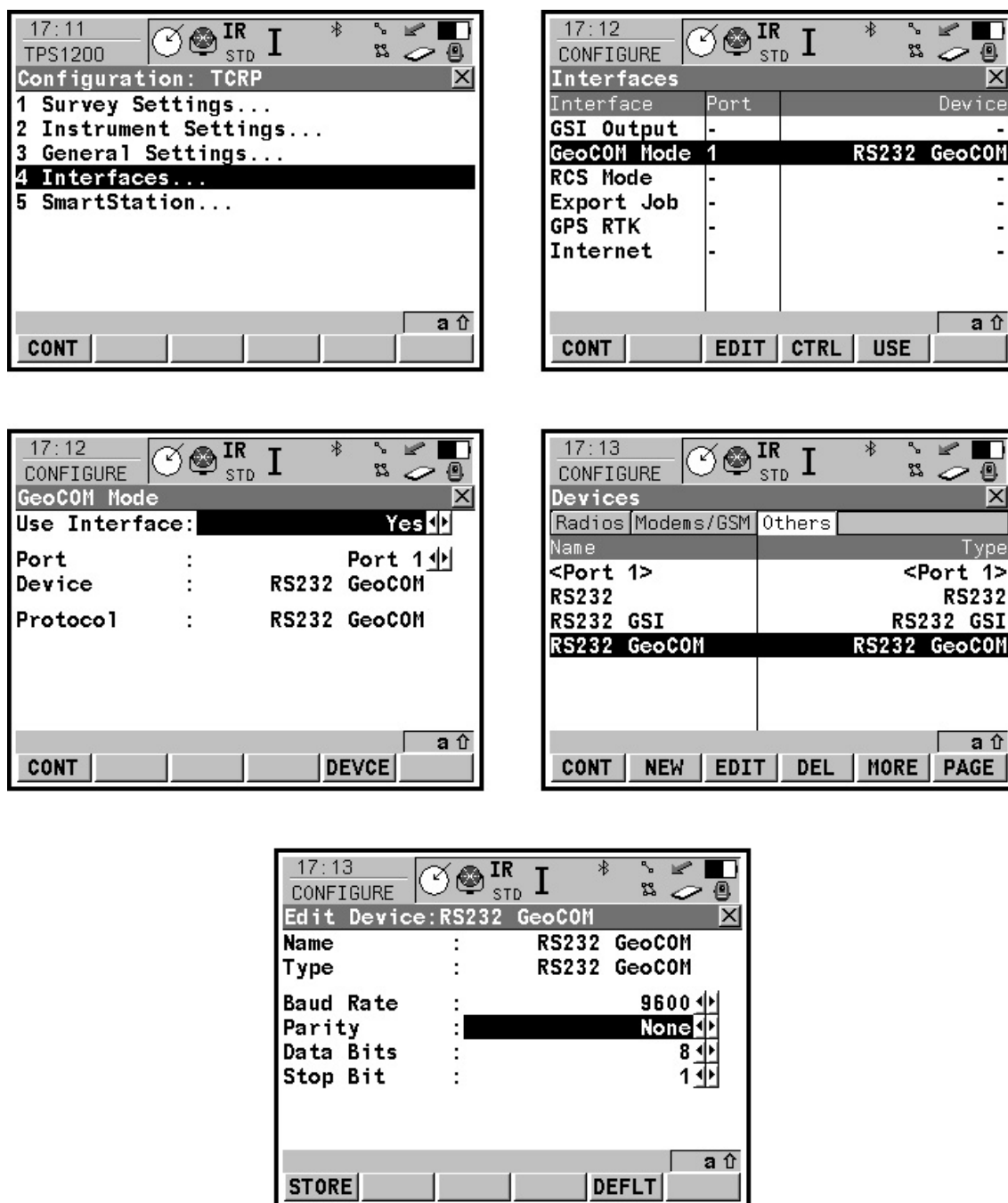


FIGURA 3.5 – SEQÜÊNCIA DE TELAS PARA CONFIGURAÇÃO DA COMUNICAÇÃO SERIAL NA ETR ETR LEICA TCR 1205 R100  
FONTE: Modificado pelo autor (2013).

NOTA: As telas de operação da TCR 1205 R100 são iguais às do modelo TPS 1200. Para a geração desta figura utilizou-se um emulador e menus da ETR fornecido pela *Leica Geosystems* para uso em treinamentos com a estação TPS 1200.

No Matlab o uso da comunicação serial necessita da criação de um *objeto tipo serial*. Segue-se um exemplo de criação diretamente na janela *Command* do Matlab e a correspondente resposta com um resumo da situação momentânea. Uma inspeção completa do objeto pode ser feita a partir da janela *Workspace* com o *Property Inspector*, que é aberto a partir de um clique sobre o correspondente objeto na lista.

```
>> ETR = serial('COM3','BaudRate',9600,'Terminator','LF')
```

```
Serial Port Object : Serial-COM3
```

#### Communication Settings

```
Port:          COM3
BaudRate:      9600
Terminator:    'LF'
```

#### Communication State

```
Status:        closed
RecordStatus:  off
```

#### Read/Write State

```
TransferStatus: idle
BytesAvailable: 0
ValuesReceived: 0
ValuesSent:     0
```

Os parâmetros de configuração de um objeto serial também podem ser alterados ou consultados na janela *Property Inspector*, ou a qualquer momento a partir de comandos específicos. No exemplo seguinte:

```
set(ETR,'Parity','None')
get(ETR,'BaudRate')
```

o comando *set* configura o bit de paridade para *None* e o comando *get* é uma forma conveniente de conferir a condição momentânea de um ou mais parâmetros de configuração. Embora seja possível alterá-los a qualquer tempo, em geral isto é feito antes do início da comunicação de dados entre os dois dispositivos envolvidos.

Tipicamente um objeto serial é criado no início de uma sessão do Matlab, Posteriormente, a porta correspondente a este objeto pode ser aberta e fechada tantas vezes quanto for necessário ou conveniente. Uma vez encerrada a necessidade de comunicação de dados, o objeto pode eliminado com o comando *clear nome\_do\_objeto*, o que libera a porta para outros usos.

No caso deste trabalho foram criados *M-files*<sup>18</sup> para realizar – em alto nível, no ambiente Matlab – as funções do protocolo GeoCOM/ASCII necessárias à configuração e à operação da ETR no levantamento topográfico cinemático com o VLTC. Cada *M-file* foi associado a uma única tarefa específica e, para todos eles, foi adotada internamente a seguinte estruturação:

1. abertura da porta ETR;
2. escrita da *string* de comando;
3. leitura da *string* de retorno no buffer de entrada;
4. fechamento da porta ETR;
5. processamento da *string* de retorno para desconsideração do cabeçalho e extração das informações solicitadas.

A porta ETR fica efetivamente aberta apenas durante o intervalo de tempo estritamente necessário para que a ETR realize o procedimento solicitado pela *string* de comando<sup>19</sup> e para que o Matlab leia a correspondente *string* de retorno, o que esvazia o *buffer* de entrada. Este procedimento aumenta a segurança da comunicação porque minimiza a possibilidade de receber informações espúrias no *buffer* de entrada devido a ruídos ou quaisquer outros motivos.

O exemplo da página seguinte mostra o *M-file* que efetua a leitura dos valores de X, Y e Z do alvo na última medida efetuada pela ETR. A abundância de

---

<sup>18</sup> No Matlab, os M-files (também chamados de scripts) são arquivos de texto contendo seqüências de comandos para a realização de uma determinada tarefa ou função. A sintaxe e os comandos são os mesmos usados na janela Command Window.

<sup>19</sup> O gerenciamento deste procedimento, que acontece entre as etapas 2 e 3 da estrutura adotada para os *M-files*, é então realizado pelo GeoCOM Server, que fica embutido na ETR (ver figura 3.3).



comentários e a própria formatação do arquivo tornam a correlação do exemplo com a estruturação adotada praticamente imediata.

```
% INICIO DO ARQUIVO GET_Target_XYZ.m

% Arquivo M da funcao GET_Target_XYZ
% TAREFA ENVOLVIDA: Efetuar a LEITURA DOS VALORES XYZ
% (ENH) DA ULTIMA MEDIDA feita pela ETR.
% Elaborado por Raul Friedmann em 02-abr-2013.
% Ultima revisão em 03-abr-2013.

fopen(ETR)          % Abre a porta serial da ETR

CR = char(13);      % Carriage Return
LF = char(10);      % Line Feed
                    % (Caracteres ASCII nao imprimiveis)

string_de_comando = [ '%R1Q,2116:' CR LF ];
% String do GeoCOM command TMC_GetSimpleCoordinate

fprintf(ETR,string_de_comando) % Escreve a string na ETR
string_de_retorno = fscanf(ETR); % Resposta ASCII da ETR
                    % no protocolo GeoCOM
                    % %R1P,0,0:0,E,N,H

fclose(ETR)         % Fecha a porta serial da ETR

% Tratamento da string de retorno para
% extracao dos valores de X Y Z em forma de numero.
comprimento_do_retorno = size(string_de_retorno); % [ 1 n ]
comprimento_do_retorno = comprimento_do_retorno(2); % valor de n
XYZ = str2num(string_de_retorno(12:comprimento_do_retorno));
% XYZ Processa a resposta ASCII da ETR desconsiderando
% os 11 primeiros caracteres da string de retorno (%R1P,0,0:0,)
% e transformando o restante da string (E,N,H) em números (str2num)
% para extrair os valores de X Y Z.
Xmed = XYZ(1);
Ymed = XYZ(2);
Zmed = XYZ(3);

% FIM DO ARQUIVO GET_Target_XYZ.m
```

Com relação à *string* de comando efetivamente enviada, é oportuno comentar que ela é formada pela concatenação de 3 vetores de caracteres ASCII: (1) a *string de comando do protocolo GeoCOM*, (2) o caracter não-imprimível *Carriage Return*, (3) o caracter não- imprimível *Line Feed*.

Para a extração das informações numéricas contidas na *string* de retorno, a abordagem geral foi (1) gerar uma nova *string* suprimindo o cabeçalho da *string* de retorno e (2) converter esta nova *string* em números usando a função *str2num* (mnemônico *de string to number*). Esta abordagem pode ser usada para extrair os valores retornados pelo protocolo GeoCOM para qualquer comando dos grupos CONF, PUT e GET porque a *string* de retorno de cada um deles possui uma resposta ASCII padronizada e, portanto, um cabeçalho de comprimento fixo que pode ser desconsiderado ou suprimido por funções para tratamento de *strings*.

O *M-file* GET\_Target\_XYZ descrito anteriormente extrai os valores resultantes das coordenadas X, Y e Z da última medida efetuada pela ETR, mas não ordena que a medida seja realizada. Para esta tarefa criou-se o *M-file* MEASURE\_Target\_XYZ, cuja *string* de comando foi definida por:

```
[ '%R1Q,2008:1' CR LF ]
```

e que corresponde ao *GeoCOM command* TMC\_DoMeasure.

Foge ao escopo desta seção listar e comentar exaustivamente todos os *M-files* desenvolvidos para o controle do levantamento via Matlab, mas cabe citar que procedimentos preliminares como a definição das coordenadas do ponto ocupado pela ETR e demais parâmetros de sua orientação no sistema de coordenadas local podem ser feitos tanto via *M-files* quanto via painel de controle do instrumento.

## 3.2 SOBRE O VEÍCULO NÃO TRIPULADO EMPREGADO NESTE TRABALHO

### 3.2.1 Motivação e nomenclatura adotada

O já citado relatório de Durrant-White (2001) enfatiza a necessidade de "haver uma definição precisa e finita dos requisitos da missão para que um sistema seja desenvolvido", a impossibilidade prática de desenvolver um veículo autônomo para todos os tipos de missões com veículos autônomos terrestres e afirma que "um objetivo final bem definido, com tipos específicos de missão e condições específicas

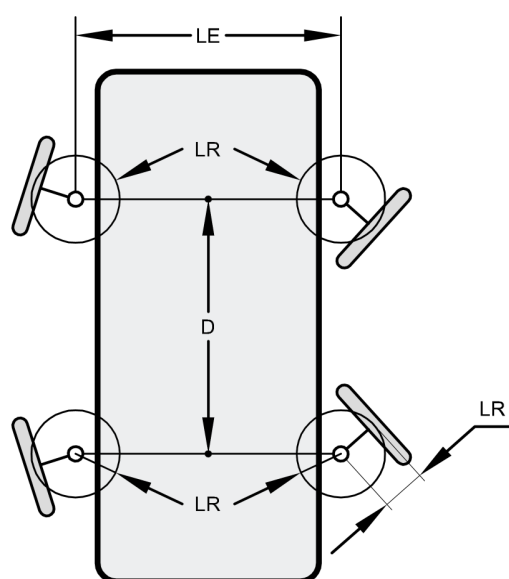
de terreno, imediatamente torna tratável o problema de desenvolvimento de autonomia."

Um objetivo específico deste trabalho é a *realização de levantamentos topográficos cinemáticos no interior de uma área de terreno previamente delimitado com ênfase na obtenção da componente altimétrica*. A técnica de varredura no terreno através de faixas idealmente paralelas (no aspecto planimétrico) favorece este tipo de levantamento. *Um veículo essencialmente bidirecional, capaz de realizar não apenas movimentos em linha reta e em curva, mas também em diagonal e de giro horizontal em torno do seu centro geométrico oferece uma versatilidade de movimento muito superior ao que é possível de se obter com a tradicional solução proporcionada pela geometria de Ackermann.*

A versatilidade de movimentos úteis ao tipo específico de missão constituiu o principal motivo do desenvolvimento de um veículo dedicado e, conforme exposto no início da seção Metodologia, a expressão ***Veículo terrestre não tripulado para Levantamentos Topográficos Cinemáticos*** (VLTC). será empregada para descrevê-lo de agora em diante.

### 3.2.2 Geometria funcional do VLTC e movimentos decorrentes

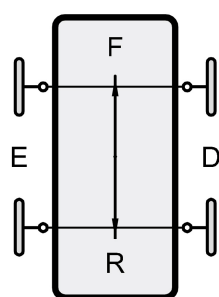
A figura 3.6 ilustra a geometria básica funcional do veículo e os principais movimentos por ela proporcionados – e que, devidamente combinados, interessam diretamente à realização de levantamentos topográficos cinemáticos. Nas dfiguras 3.7 e 3.8 encontram-se fotografias do veículo implementado durante o trabalho.



$D$  - Distância entre eixos

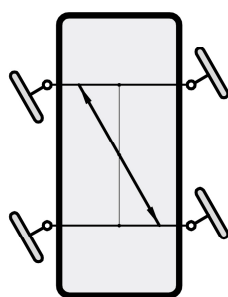
$LE$  - Largura dos eixos principais

$LR$  - Raio de giro efetivo dos conjuntos das rodas



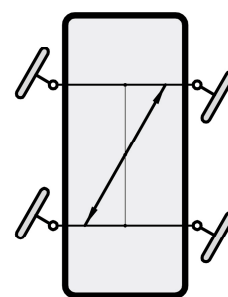
$LR$

LINHA RETA



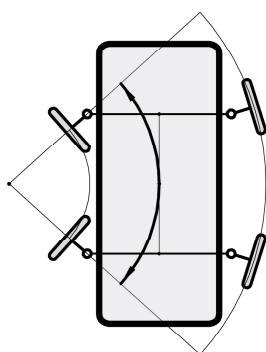
$DLE$

DESVIO LATERAL para a ESQUERDA



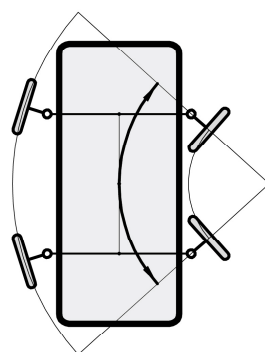
$DLD$

DESVIO LATERAL para a DIREITA



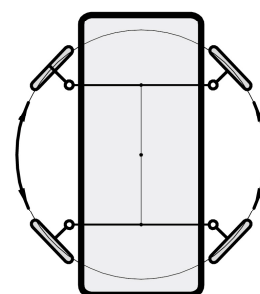
$CE$

CURVA para a ESQUERDA



$CD$

CURVA para a DIREITA



$GIRO$

GIRO sobre o próprio eixo

FIGURA 3.6 – GEOMETRIA BÁSICA FUNCIONAL DO VLTC E PRINCIPAIS MOVIMENTOS POR ELA PROPORCIONADOS  
FONTE: Autor (2012).

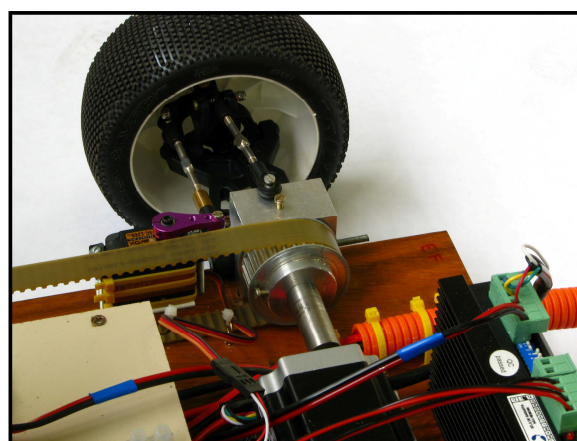
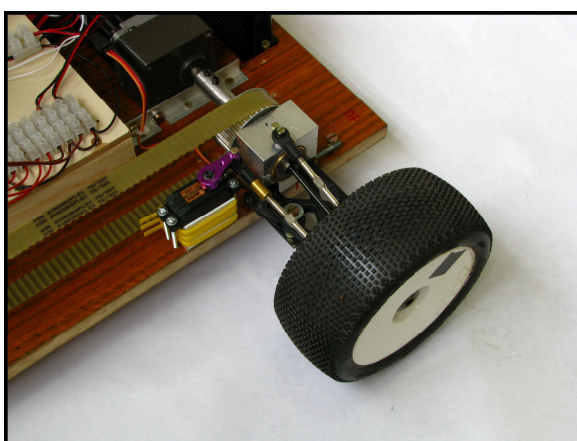
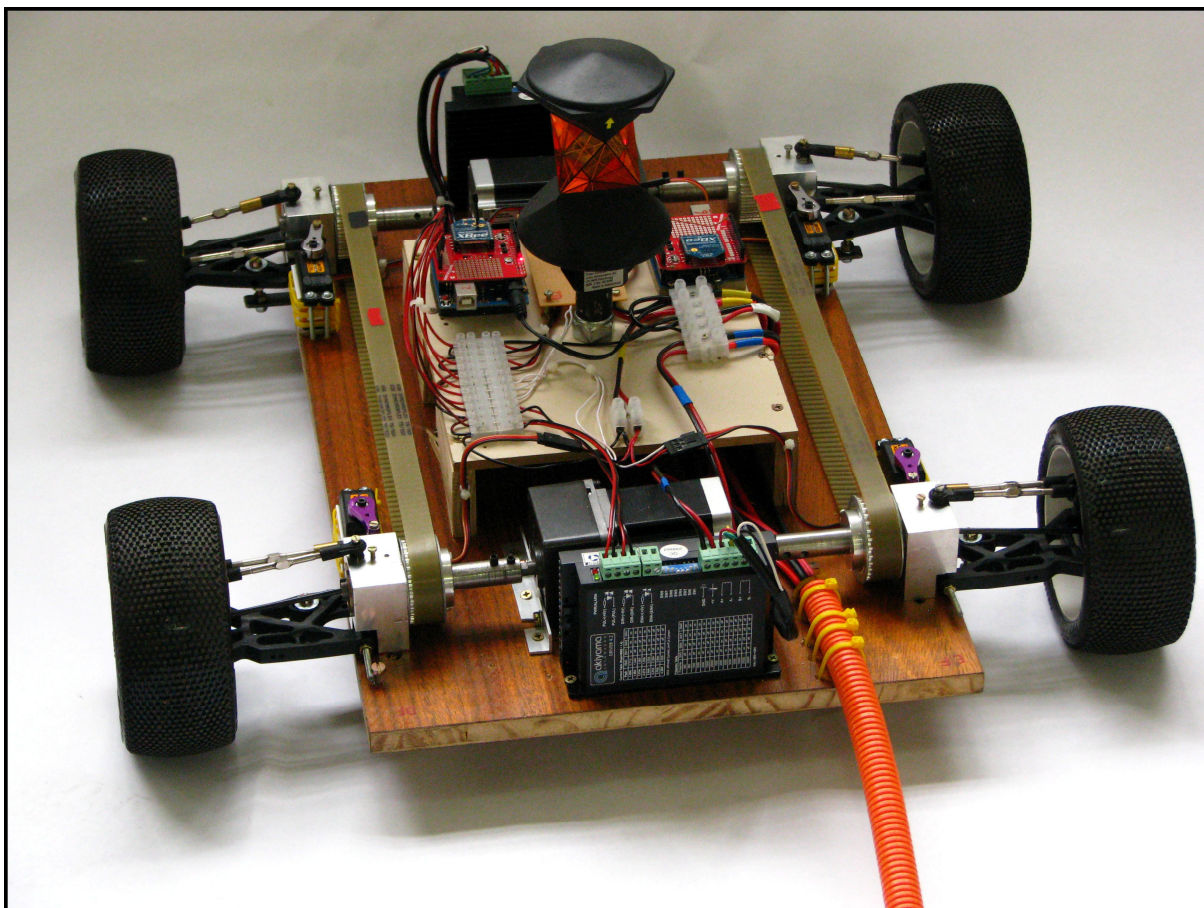


FIGURA 3.7 – FOTOGRAFIAS DO VLTC IMPLEMENTADO / PARTE 1  
FONTE: Autor (2013)



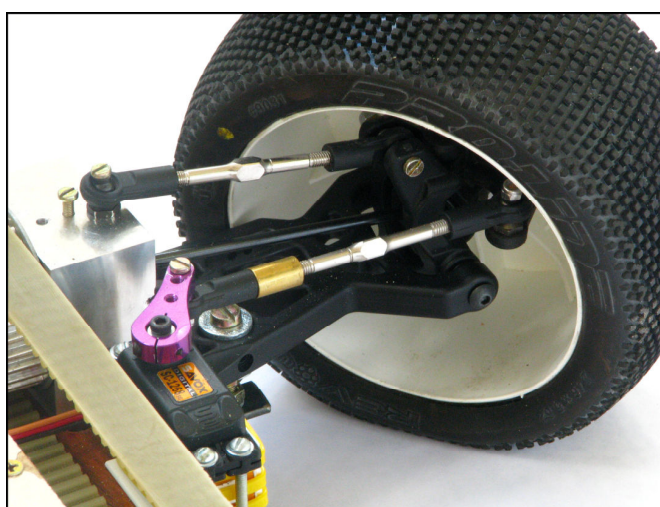
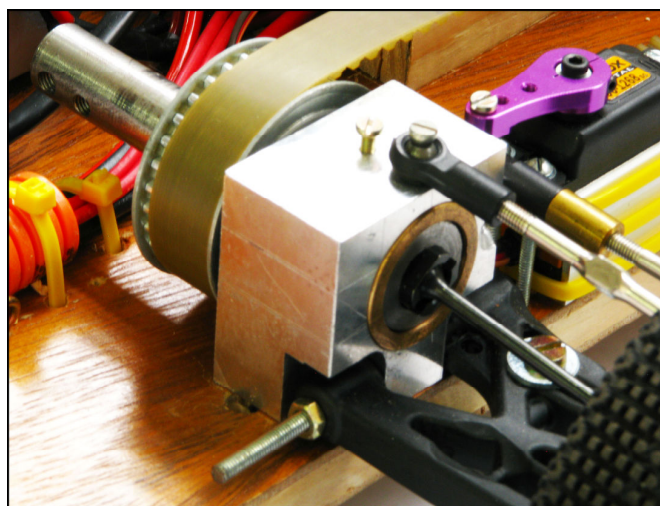
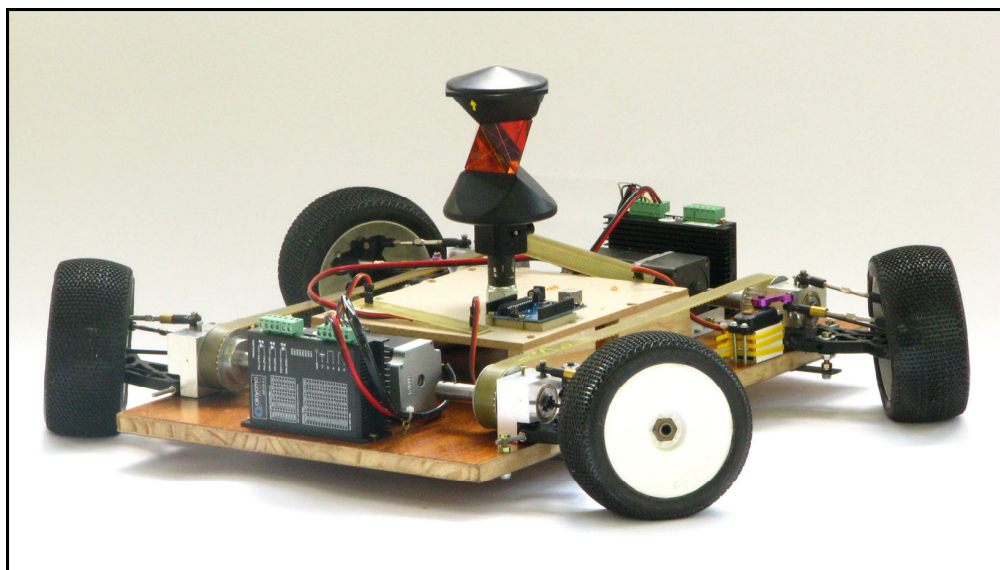


FIGURA 3.8 – FOTOGRAFIAS DO VLTC IMPLEMENTADO / PARTE 2  
FONTE: Autor (2013)

O VLTC é essencialmente um veículo simples com tração nas quatro rodas (4x4), bidirecional, em escala reduzida, elétrico, alimentado por baterias, tracionado por dois motores de passo e com sistema de direção formado por rodas comandadas por quatro servomotores independentes (ver figuras 3.7 e 3.8). O seu desenvolvimento considerou primariamente a versatilidade de movimentos utilizáveis em levantamentos topográficos cinemáticos experimentais. Requisitos como obtenção de velocidades e acelerações relativamente elevadas e a capacidade de transpor terrenos irregulares e obstáculos ficaram em segundo plano.

Por ser um veículo dedicado à realização de levantamentos, optou-se por mecanismos de tração e de direção que (a) favorecessem a capacidade de controlar a posição atual e de prever prováveis posições a serem ocupadas e (b) que permitissem a obtenção de deslocamentos e de posições determinados antecipadamente a partir de funções de alto nível. Esta abordagem facilita o uso desta plataforma em outros trabalhos de pesquisa na áreas de Levantamentos e demais segmentos das Ciências Geodésicas, uma vez que seus pesquisadores não estão usualmente familiarizados com os sistemas eletrônicos e mecânicos empregados em Automação Industrial e em Robótica.

### 3.2.3 Critérios adotados para o *design* do VLTC

O *design* básico do veículo, a opção pelo uso de motores de passo nas rodas tratoras e a opção por servomotores nos controles de direção procuram atender os seguintes critérios:

- geometria funcional simples, mas versátil do ponto de vista da realização de manobras;
- comportamento bidirecional, no sentido de permitir movimentos de ida e de volta numa mesma trajetória e com desempenho semelhante;

- viabilidade de implementação de funções de deslocamento baseadas em figuras geometricamente simples como segmentos de reta e arcos de circunferência;
- se necessário, determinação relativamente simples da navegação estimada (*dead reckoning*).

### 3.2.4 Sobre o sistema de tração do VLTC

A motorização das quatro rodas tratoras é realizada através de dois motores de passo de uso industrial e já acoplados mecanicamente a caixas de redução (figura 3.9). O emprego de um único motor de passo para o tracionamento das duas rodas de um lado é possível porque, em todas as funções de movimentação (descritas em seções mais adiante), as velocidades angulares das rodas são iguais entre si ( $\omega_{DF} = \omega_{DR}$  e  $\omega_{EF} = \omega_{ER}$ )<sup>20</sup> e, como todas as rodas são iguais, o mesmo acontece com as respectivas velocidades tangenciais ( $V_{DF} = V_{DR}$  e  $V_{EF} = V_{ER}$ ). Esta condição de igualdade, no caso, foi obtida pelo uso de polias dentadas e de correias sincronizadoras, uma solução usual em sistemas de automação industrial.

A opção pelo uso destes motores de passo foi baseada nas necessidades de (a) priorizar os procedimentos de navegação estimada, (b) de prover o conjunto de torque adequado e (c) na disponibilidade de *drivers* específicos para seu acionamento.

O uso de caixas de redução já incorporadas ao motor e com fatores de redução relativamente altos favorece o atendimento destas necessidades, embora implique em menores velocidades – situação que, no caso deste trabalho, não é um problema. Num mesmo tipo básico de veículo, a tração nas quatro rodas (4x4) é uma solução que, se comparada à tração em apenas duas rodas, sempre melhora a capacidade de movimentação do veículo em diversos terrenos e situações e também

---

<sup>20</sup> No caso,  $\omega$  representado velocidade angular,  $V$  a velocidade tangencial,  $D$  e  $E$  os lados direito e esquerdo,  $F$  e  $R$  as seções da Frente e da Ré do VLTC.



provê melhor distribuição de esforços sobre as rodas. Além disto, ela é evidentemente mais adequada à operação de veículos essencialmente bidirecionais, no qual frente e ré são conceitos relativos, caso do VLTC.



FIGURA 3.9 – MOTOR DE PASSO, POLIA E CORREIA SINCRONIZADORA  
FONTE: Autor (2012).

A solução da tração do VLTC tem uma vantagem em relação ao clássico arranjo de três diferenciais mecânicos abertos em veículos 4x4: todas as rodas continuam atuantes, mesmo que alguma delas perca contato o solo ou não disponha de atrito suficiente.

### 3.2.5 Sobre o sistema de direção do VLTC

O controle de direção do VLTC é realizado por meio de quatro conjuntos semelhantes e independentes, dispostos simetricamente, que permitem ao veículo posicionar suas rodas para realizar movimentos em linha reta, movimentos em diagonal, movimentos em curva e de giro em torno do próprio eixo (ver figura 3.6) . A bem da objetividade, o movimento de giro em torno do próprio eixo poderia ser melhor descrito como "rotação horizontal em torno do centro geométrico do veículo", mas a primeira expressão é mais usual.

Para os conjuntos das rodas (pneus, cubos, rolamentos, juntas universais, eixos-cardã, acoplamentos e acessórios diversos) foram selecionados componentes de série utilizados em automodelismo de competição *off-road* em escala 1/8. Os componentes foram selecionados entre modelos usualmente empregados por competidores de alto nível em âmbito nacional, a fim de garantir soluções mecânicas resistentes e amplamente testadas em condições de terreno mais adversas que as áreas de teste empregadas neste trabalho.

### 3.2.6 Funções de controle do VLTC

As funções básicas de controle do VLTC podem ser divididas em quatro categorias:

1. *funções de posicionamento das rodas;*
2. *funções de movimento em linha reta;*
3. *funções de movimento em curva;*
4. *funções de giro em torno do próprio eixo.*

As *funções de posicionamento das rodas* são funções aplicadas ao veículo parado e que antecedem *funções de movimento em linha reta*, *funções de movimento em curva* ou *funções de giro*, todas elas descritas mais adiante. O repertório básico das funções descritas nestes quatro grupos permite realizar seqüências de combinações capazes de:

- movimentar o veículo em trajetórias formadas por linhas retas e arcos concatenados;
- executar conjuntos de movimentos necessários aos levantamentos cinemáticos pretendidos;

- criar funções compostas para atender procedimentos como, por exemplo, desvios de obstáculos pontuais e procura em torno de um ponto.

Por exemplo, a figura 3.10 ilustra uma possível seqüência de uso de funções e que permitiria realizar um levantamento topográfico cinemático dentro de uma área de limites previamente especificados. A exatidão deste levantamento estaria relacionada a diversos fatores: (a) a exatidão do sistema de posicionamento, (b) o espaçamento entre linhas de varredura, (c) a quantidade de pontos coletados como amostra ao longo da trajetória do veículo, (d) a variação real do relevo, (e) a capacidade dos modelos matemáticos usados para tratar os dados coletados etc.

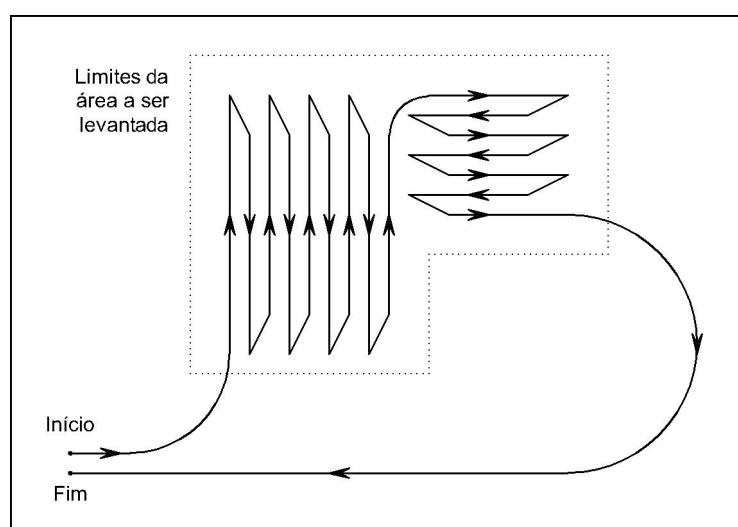


FIGURA 3.10 – EXEMPLO DE UMA SEQUÊNCIA DE MOVIMENTOS DO VLTC PARA EXECUÇÃO DE LEVANTAMENTOS EM UMA ÁREA DE LIMITES PREVIAMENTE ESPECIFICADOS  
FONTE: Autor (2011)

As funções propostas podem ser implementadas em linguagens como C ou em ambiente *Matlab*, que, além do processamento de alto nível, permitem (a) acessar portas de comunicação dos computadores, (b) criar funções para controle de hardware externo e (c) adquirir informações de dispositivos externos com capacidade de comunicação em protocolos diretamente compatíveis ou através de *toolboxes* específicas.

A criação de funções para controlar os motores de passo através de linguagens de alto nível torna mais simples o controle do VLTC e futuras adaptações

do veículo para outras finalidades, o que pode facilitar possíveis usos desta plataforma em Geodésia Aplicada.

A figura 3.11 ilustra dois exemplos de funções que poderiam ser implementadas a partir das funções básicas especificadas. Na parte de cima encontra-se uma possível função de desvio de obstáculo pontual. Na parte de baixo encontra-se uma função de procura em torno de um ponto, que poderia ser feita através de uma falsa espiral formada pela concatenação de arcos de semicircunferência com raios em progressão aritmética.

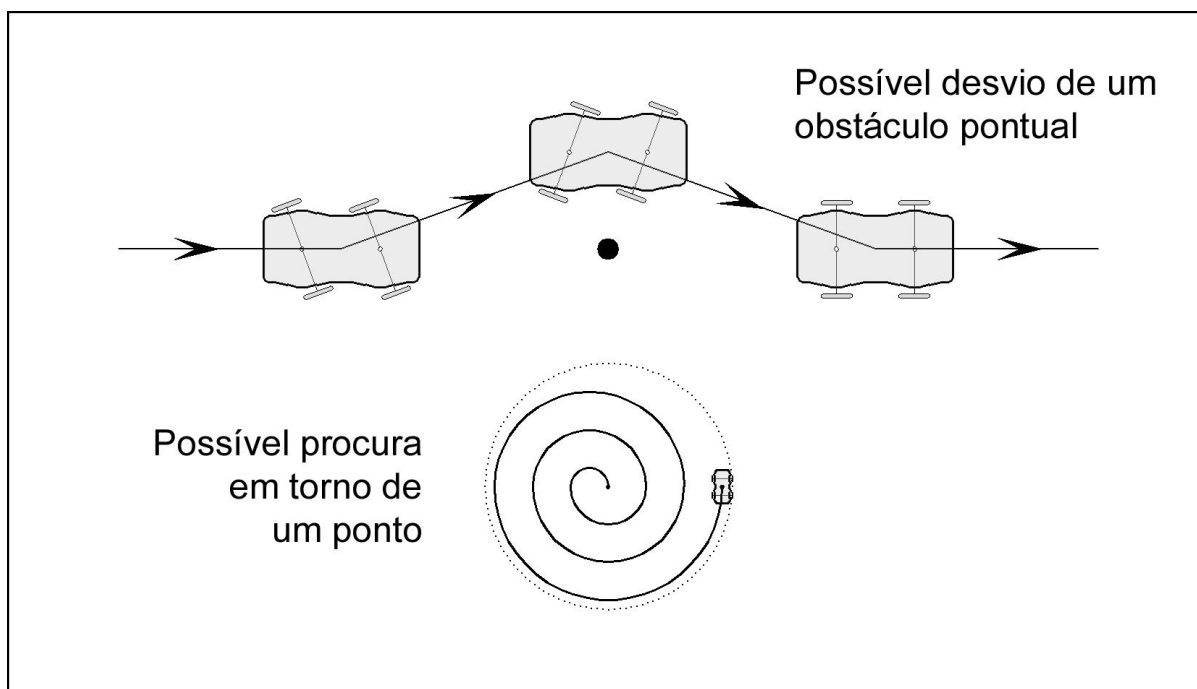


FIGURA 3.11 – EXEMPLOS DE POSSÍVEIS FUNÇÕES COMPOSTAS  
FONTE: Autor (2013).

### 3.2.7 Funções de posicionamento das rodas

As *funções de posicionamento das rodas* (quadro 3.1 e figura 3.12) são funções aplicadas ao veículo parado e preparam o VLTC para iniciar deslocamentos em linha reta, deslocamentos em linhas curvas de raio constante ou um giro em torno do próprio eixo. Isto é feito posicionando-se os conjuntos da rodas nas direções necessárias para o início das funções de movimento.

$LR$	Posiciona as rodas para movimento em <b>Linha Reta</b> e na direção do eixo principal do veículo
$DLD(\theta)$	<b>Desvio Lateral</b> para a <b>Direita</b>
$DLE(\theta)$	<b>Desvio Lateral</b> para a <b>Esquerda</b>
$CD(rg_v)$	<b>Curva</b> para a <b>Direita</b>
$CE(rg_v)$	<b>Curva</b> para a <b>Esquerda</b>
$GIRO$	Posiciona as rodas para giro sobre o próprio eixo

QUADRO 3.1 – FUNÇÕES DE POSICIONAMENTO DAS RODAS  
FONTE: Autor (2011)

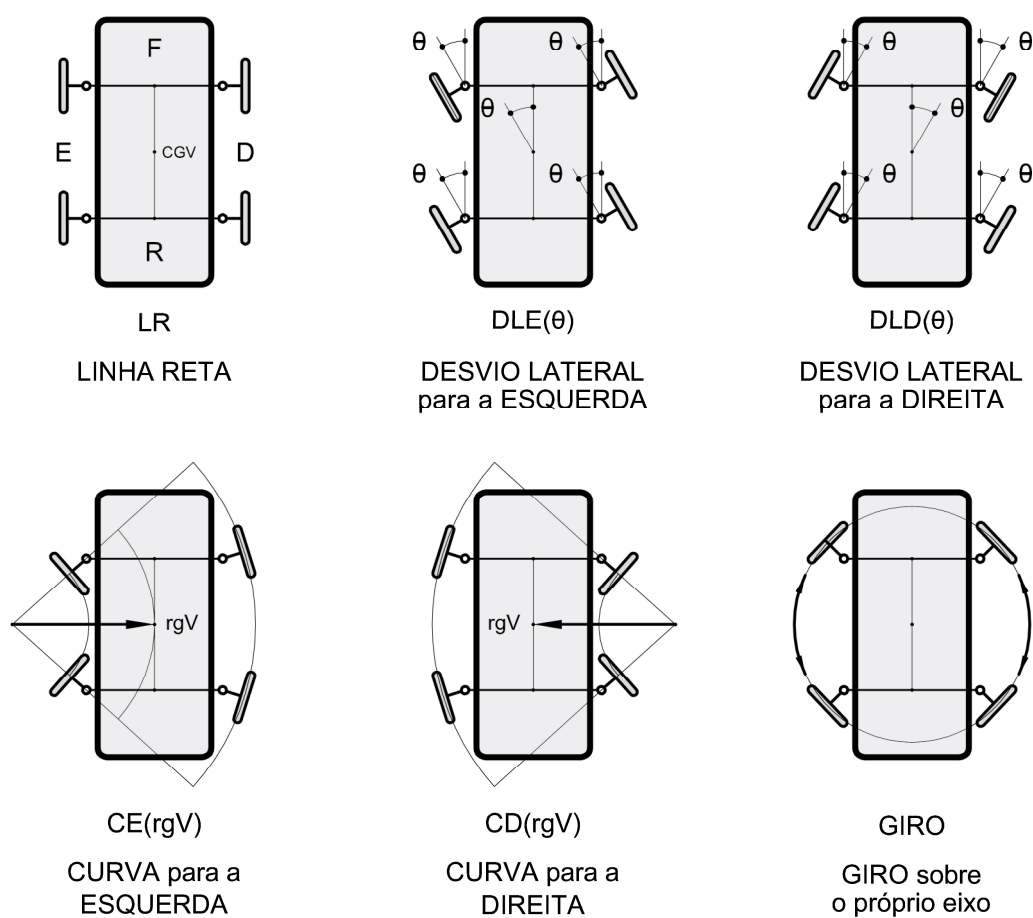


FIGURA 3.12 – FUNÇÕES DE POSICIONAMENTO DAS RODAS  
E RESPECTIVOS PARÂMETROS  
FONTE: Autor (2012)

A função  $LR$ , sem parâmetros, simplesmente posiciona as rodas de forma a preparar o VLTC para movimentos em linha reta na direção do seu eixo principal (ou seja, do seu eixo de simetria longitudinal).

As funções  $DLD(\theta)$  e  $DLE(\theta)$  usam como parâmetro único o ângulo  $\theta$ , que descreve o ângulo entre a direção principal do veículo e a direção desejada para o conjunto das quatro rodas. Nestas duas funções as rodas devem girar uniformemente e suas direções finais devem ser paralelas entre si.

As funções  $CD(rg_v)$  e  $CE(rg_v)$  usam como parâmetro básico um raio de giro especificado para o movimento do veículo (ver seção 4.2.10). O raio de giro é medido do centro geométrico do veículo (CGI) ao centro instantâneo de giro (CIG), ponto em torno do qual o veículo forma um sistema de pontos materiais que está em rotação pura. A partir deste raio de giro podem ser determinados os respectivos ângulos de giro dos conjuntos das rodas externas ( $\theta_{ext}$ ) e internas ( $\theta_{int}$ ).

A função  $GIRO$ , também sem parâmetros, posiciona as rodas de modo a preparar o VLTC para um giro em torno do seu próprio eixo.

### 3.2.8 Funções de movimento em linha reta

As *funções de movimento em linha reta* listadas no quadro 3.2 e ilustradas na figura 3.13, podem ser aplicadas após as funções  $LR$ ,  $DLD(\theta)$  e  $DLE(\theta)$ .

$F(d_{reta})$	Movimento para a <b>F</b> rente em linha reta
$R(d_{reta})$	Movimento para a <b>R</b> é em linha reta

QUADRO 3.2 – FUNÇÕES DE MOVIMENTO EM LINHA RETA  
FONTE: Autor (2011)

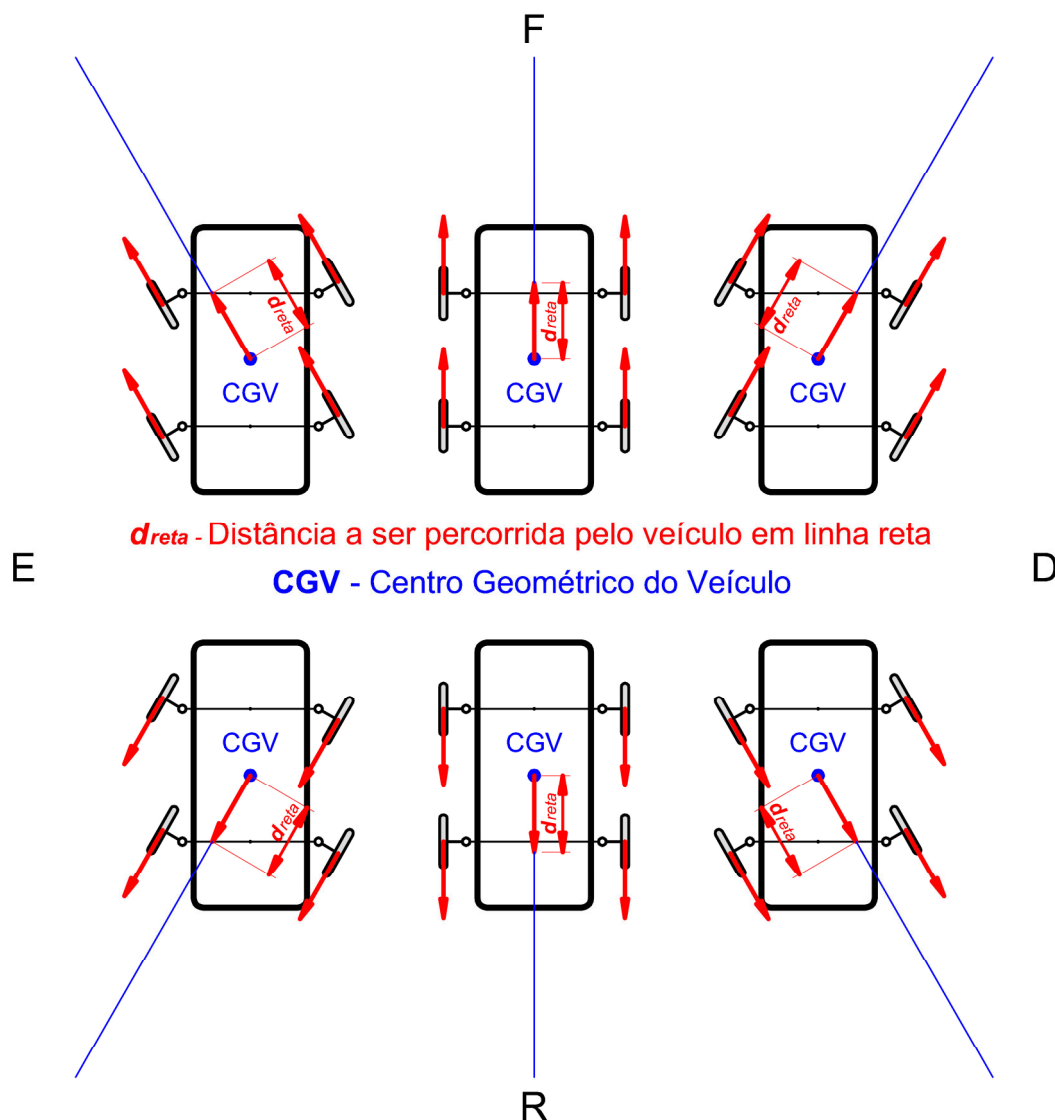


FIGURA 3.13 – MOVIMENTOS EM LINHA RETA  
 FONTE: Autor (2012)

Estas funções instruem o veículo a percorrer uma determinada distância em linha reta (o procedimento para isto será explicado mais adiante, nesta mesma seção). O deslocamento acontece na direção anteriormente definida pela função de posicionamento das rodas. No modo movimento em linha reta é importante observar que:

- a plataforma forma um sistema de pontos materiais que está em translação retilínea pura (BEER & JOHNSTON JR, 1980);

- as velocidades tangenciais das quatro rodas (em relação aos respectivos centros) são todas iguais entre si e iguais à velocidade do veículo ( $V_{DF} = V_{DR} = V_{EF} = V_{ER} = V$ );
- as velocidades angulares das rodas também são todas iguais entre si ( $\omega_{DF} = \omega_{DR} = \omega_{EF} = \omega_{ER} = \omega = V/R$ , onde  $R$  é a medida do raio efetivo das rodas);
- As direções das quatro rodas são paralelas entre si e paralelas à direção de deslocamento do VLTC.

### 3.2.9 Sobre o controle dos motores de passo das rodas tratoras no modo movimento em linha reta

O número de passos ( $n$ ) necessário para percorrer uma determinada distância em linha reta ( $d_{reta}$ ) com um motor de passo de avanço  $\phi_{mp}$ , uma caixa de engrenagens com fator de redução  $k_{mp}$  e rodas tratoras de raio  $R$  pode ser determinado da seguinte forma:

$$\Delta_{mp} = \phi_{mp} / k_{mp} \quad (3.1)$$

$$\Delta_{roda} = \Delta_{mp} \cdot R \quad (3.2)$$

$$\Delta_{roda} = \Delta_{veiculo} = R \cdot \frac{\phi_{mp}}{k_{mp}} \quad (3.3)$$

$$n \cdot \Delta_{roda} = n \cdot \Delta_{veiculo} = d_{reta} = n \cdot R \cdot \frac{\phi_{mp}}{k_{mp}} \quad (3.4)$$

$$n = \frac{d_{reta}}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \quad (3.5)$$



$\Delta_{mp}$	avanço angular por passo do motor já considerada a redução
$\phi_{mp}$	avanço angular por passo do motor não considerada a redução
$k_{mp}$	fator de redução da caixa de engrenagens associada ao motor de passo
$\Delta_{roda}$	avanço linear das rodas para cada passo do motor no modo movimento em linha reta
$\Delta_{veiculo}$	avanço linear do centro geométrico do veículo para cada passo do motor no modo movimento em linha reta
$R$	raio efetivo das rodas tratoras
$n$	número de passos aplicados ao motor
$d_{reta}$	distância em linha reta a ser percorrida pelo centro geométrico do veículo (CGV)

Convém observar que o número de passos ( $n$ ) pode ser expresso pela razão entre o ângulo total de giro necessário ao avanço da distância desejada e o avanço efetivo do motor de passo correspondente, já considerada a redução, ou seja:

$$n = \frac{\frac{d_{reta}}{R}}{\frac{\phi_{mp}}{k_{mp}}} \quad (3.6)$$

Com o veículo se movendo em velocidade constante, a frequência dos passos do motor ( $f$ ) relacionada a uma determinada velocidade tangencial  $V$  poderia ser determinada de modo semelhante. Sendo  $n$  o número de passos aplicado num intervalo de tempo  $\Delta_t$ :

$$\frac{n \cdot \Delta_{roda}}{\Delta_t} = \frac{d_{reta}}{\Delta_t} = V = f \cdot \Delta_{roda} = f \cdot R \cdot \frac{\phi_{mp}}{k_{mo}} \quad (3.7)$$

$$V = f \cdot R \cdot \frac{\phi_{mp}}{k_{mp}} \quad (3.8)$$

$$f = \frac{V}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \quad (3.9)$$

$V$  velocidade de deslocamento das rodas e do centro geométrico do veículo no modo movimento em linha reta

$f$  frequência de excitação dos motores de passo no modo movimento em linha reta

$\Delta_t$  intervalo de tempo considerado

### 3.2.10 Funções de movimento em curva

As *funções de movimento em curva*, listadas no quadro 3.3 e ilustradas na figura 3.14, instruem o VLTC a se movimentar de modo que, no plano de manobra, o *centro geométrico do veículo* (CGV) percorra uma determinada *distância em curva* ( $d_{curva}$ ) sobre um arco de circunferência associado a um determinado *raio de giro do veículo* ( $rg_v$ ). Este movimento acontece em torno de um ponto virtual aqui denominado de *centro instantâneo de giro* (CIG).

$FCD(d_{curva}, rg_v)$	Movimento para a <b>Frente</b> com <b>Curva</b> para a <b>Direita</b>
$FCE(d_{curva}, rg_v)$	Movimento para a <b>Frente</b> com <b>Curva</b> para a <b>Esquerda</b>
$RCD(d_{curva}, rg_v)$	Movimento para a <b>Ré</b> com <b>Curva</b> para a <b>Direita</b>
$RCE(d_{curva}, rg_v)$	Movimento para a <b>Ré</b> com <b>Curva</b> para a <b>Esquerda</b>

QUADRO 3.3 – FUNÇÕES DE MOVIMENTO EM CURVA  
FONTE: Autor (2011)

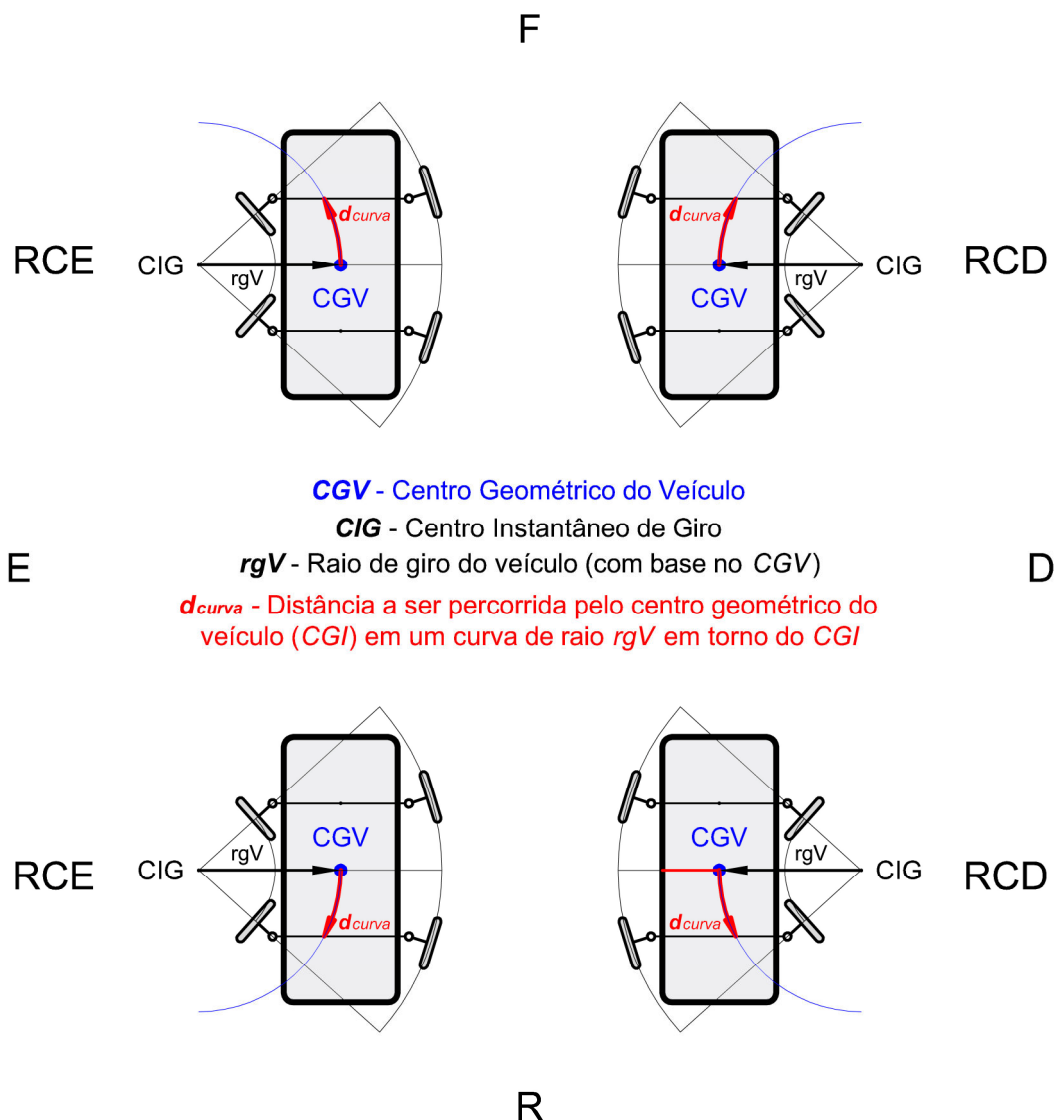


FIGURA 3.14 – MOVIMENTOS EM CURVA  
FONTE: Autor (2012).

A figura 3.14 também mostra o parâmetro *distância em curva* ( $d_{curva}$ ) em cada uma das quatro funções de movimento em que ele se aplica. O segundo parâmetro destas funções é o raio de giro do veículo ( $rg_v$ ), do qual dependem os comportamentos dos conjuntos das rodas externas e internas (analisados na próxima seção).

O comprimento de arco  $\alpha$  associado à distância percorrida em curva é expresso por:

$$\alpha = \frac{d_{curva}}{rg_v} \quad \text{arco } \alpha \text{ (em radianos) associado à distância } d_{curva} \quad (3.10)$$

onde:

$d_{curva}$  distância em curva a ser percorrida

$rg_v$  raio de giro do veículo

O movimento em curva e o respectivo controle são analisados com maior detalhamento na seção seguinte. Por ora convém manter em vista que no modo movimento em curva:

- Os ângulos de giro dos dois conjuntos das rodas externas (em módulo) são iguais entre si e são menores do que os ângulos de giro das rodas internas;
- Todas as rodas e o centro geométrico do veículo descrevem trajetórias de arcos concêntricos em torno de um ponto virtual, o centro instantâneo de giro;
- para que uma curva do VLTC no plano de manobra seja realizada sem arrasto, as rodas externas se movem com velocidades tangenciais (no plano do veículo) e com velocidades angulares (nos respectivos planos das rodas) proporcionalmente maiores que as correspondentes velocidades das rodas internas (ver figuras 3.14, 3.15 e 3.16). A proporção depende essencialmente do raio de giro do veículo,

Nesta situação a plataforma do veículo forma um sistema de pontos materiais que, no plano de manobra do veículo, está em rotação pura em relação ao CIG (BEER & JOHNSTON JR, 1980) e, portanto, a velocidade angular  $\omega_v$  é a mesma para todas as partes que o compõem. Como a velocidade tangencial do centro geométrico do veículo (CGV) e dos centros das rodas internas e externas podem ser expressas por:

$$V_v = \omega_v \cdot rg_v \quad \text{velocidade tangencial do centro geométrico do veículo (CGV)} \quad (3.11)$$

$$V_{ext} = \omega_v \cdot rg_{ext} \quad \text{velocidade tangencial das rodas externas do veículo} \quad (3.12)$$

$$V_{int} = \omega_v \cdot rg_{int} \quad \text{velocidade tangencial das rodas internas do veículo} \quad (3.13)$$

$$\omega_v \quad \text{velocidade angular do veículo em torno do seu centro instantâneo de giro (CIG)}$$

Como todas as rodas possuem raios iguais ( $R$ ), demonstra-se que a proporção entre as velocidades tangenciais das rodas externas e internas é igual à proporção de suas velocidades angulares (medidas nos respectivos planos das rodas). Esta relação pode ser descrita por:

$$\frac{V_{ext}}{V_{int}} = \frac{\omega_{ext}}{\omega_{int}} = \frac{rg_{ext}}{rg_{int}} = \frac{\sqrt{\left(rg_v + \frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} + LR}{\sqrt{\left(rg_v - \frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - LR} \quad (3.14)$$

$D$	distância entre eixos
$LE$	largura efetiva dos eixos
$LR$	raio de giro efetivo dos conjuntos das rodas
$rg_v$	raio de giro do veículo
$V_{ext}$	velocidade tangencial das rodas externas
$V_{int}$	velocidade tangencial das rodas internas
$\omega_{ext}$	velocidade angular das rodas externas
$\omega_{int}$	velocidade angular das rodas internas

A equação anterior quantifica objetivamente o fato das rodas externas possuírem maior velocidade que as internas e fundamenta o controle dos motores de passo das quatro rodas tratoras nas funções de movimento em curva. Como as dimensões  $D$ ,  $LE$  e  $LR$  são fixas (ver figuras 3.6 e 3.12), a equação mostra que a proporção entre as velocidades varia em função do valor do raio de giro da curva pretendida.

Convém observar que um raio de giro infinito corresponderia ao movimento em linha reta e que o cálculo do limite da expressão anterior resultaria no valor unitário, que indica que as velocidades tangenciais das rodas seriam iguais entre si ( $V_{ext} = V_{int} = V_{DF} = V_{DR} = V_{EF} = V_{ER} = V$ ) e que o mesmo aconteceria com as respectivas velocidades angulares ( $\omega_{ext} = \omega_{int} = \omega_{DF} = \omega_{DR} = \omega_{EF} = \omega_{ER} = \omega = V/R$ ). Estas duas igualdades são coerentes com as já comentadas funções de movimento em linha reta.

### 3.2.11 Raios de giro no modo curva

A figura 3.15 ilustra a relação entre as principais dimensões do veículo ( $D$ ,  $LE$  e  $LR$ ), o centro geométrico do veículo (CGV), o centro instantâneo de giro do veículo (CIG) no modo curva e os raios de giro associados a este tipo de movimento.

No modo curva e operando num plano, a plataforma do veículo e os eixos formam um sistema de pontos materiais que devem estar em rotação pura. Os raios de giro envolvidos estão todos associados ao centro instantâneo de giro do veículo (CIG) e serão chamados de:

- raio de giro do centro geométrico do veículo ( $rg_v$ );
- raio de giro das rodas tratoras internas ( $rg_{int}$ );
- raio de giro das rodas tratoras externas ( $rg_{ext}$ ).

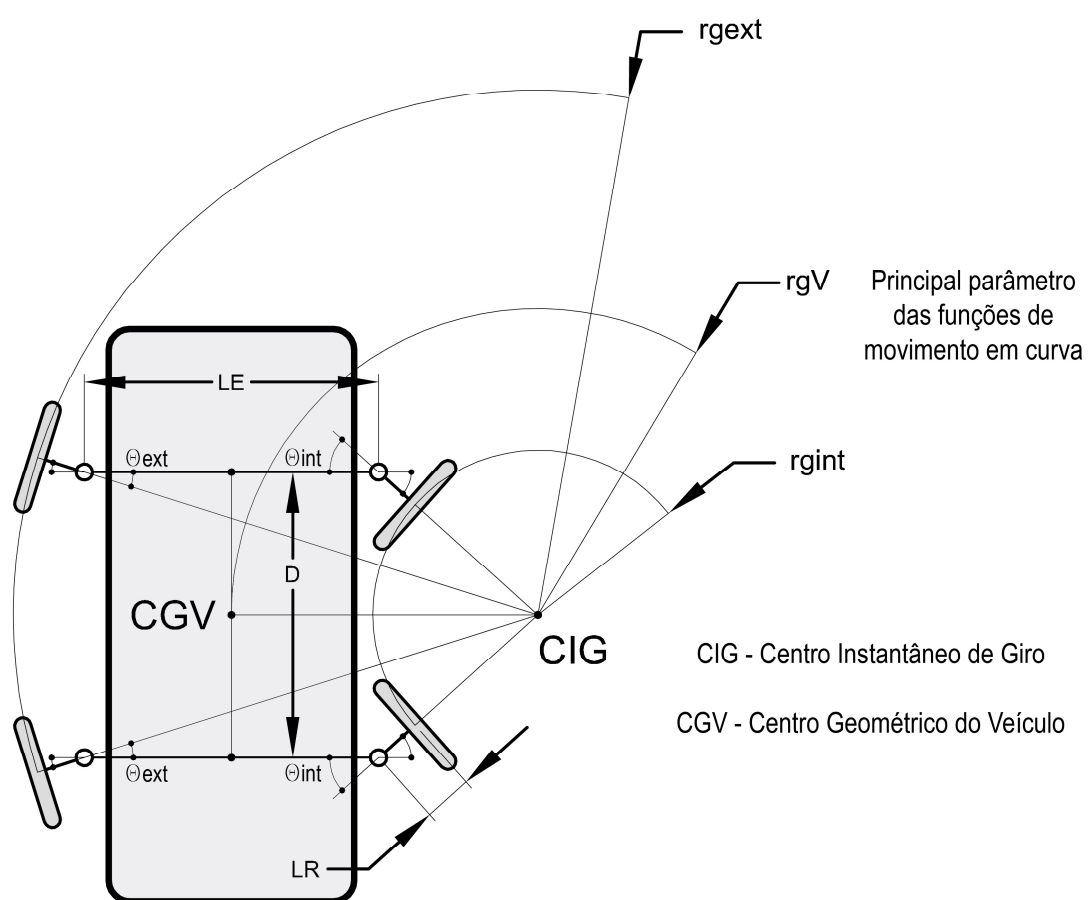


FIGURA 3.15 – RELAÇÕES ENTRE AS PRINCIPAIS DIMENSÕES CONSTRUTIVAS DO VLTC E OS RAIOS DE GIRO NAS FUNÇÕES DE MOVIMENTO EM CURVA  
FONTE: Autor (2012)

Na figura 3.16 podem ser observados os triângulos retângulos que relacionam os raios de giro ( $rg_V$ ,  $rg_{int}$ ,  $rg_{ext}$ ) com as dimensões características do veículo ( $D$ ,  $LE$ ,  $LR$ ). A partir destes triângulos podem ser determinados os seguintes parâmetros e relações:

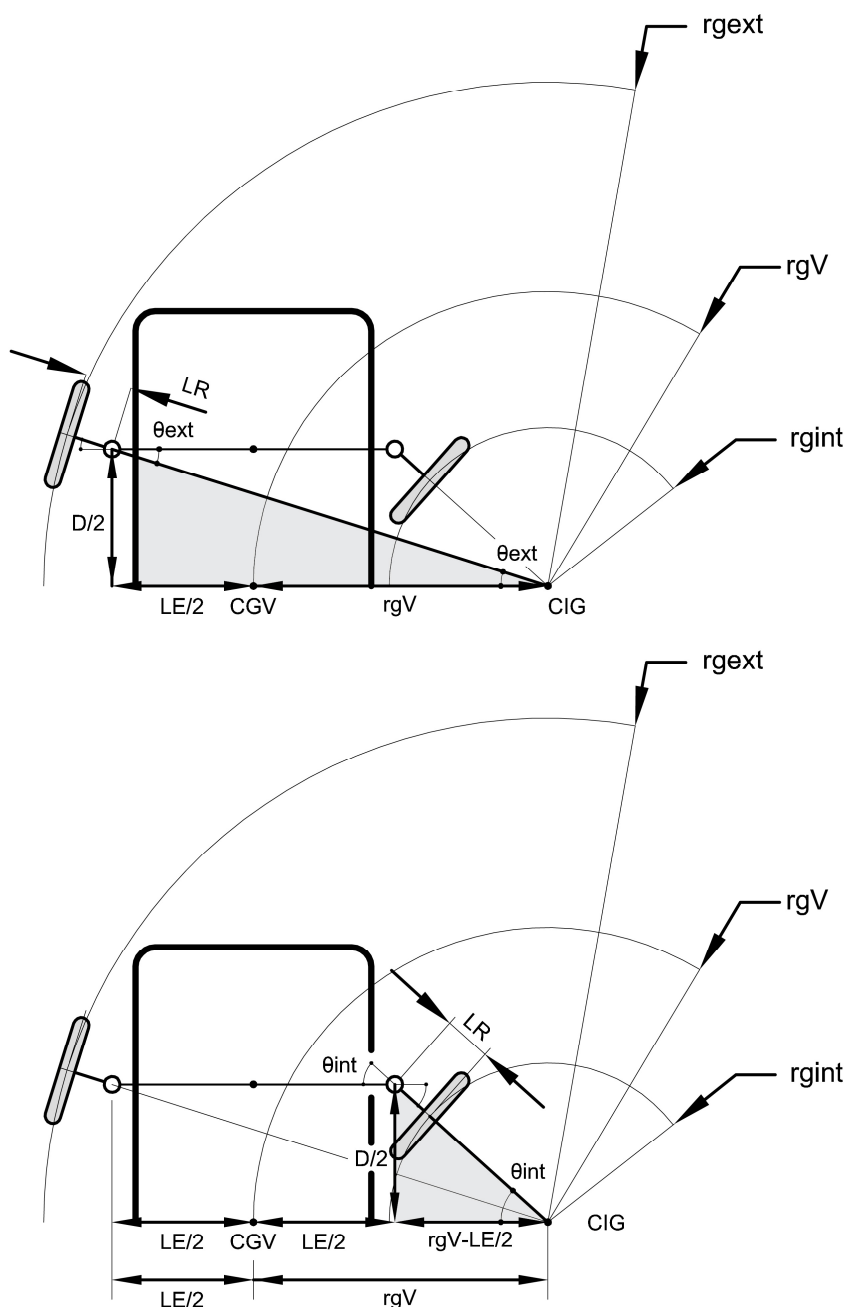


FIGURA 3.16 – DETERMINAÇÃO DOS RAIOS DE GIRO DAS RODAS EXTERNAS E INTERNAS E DOS RESPECTIVOS ÂNGULOS DE GIRO  
FONTE: Autor (2012)



$$rg_{ext} = \sqrt{\left(rg_V + \frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} + LR \quad (3.15)$$

$$rg_{int} = \sqrt{\left(rg_V - \frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - LR \quad (3.16)$$

$$\tan \theta_{ext} = \frac{\frac{D}{2}}{rg_V + \frac{LE}{2}} \quad (3.17)$$

$$\tan \theta_{int} = \frac{\frac{D}{2}}{rg_V - \frac{LE}{2}} \quad (3.18)$$

$$\theta_{ext} = \arctan\left(\frac{\frac{D}{2}}{rg_V + \frac{LE}{2}}\right) \quad (3.19)$$

$$\theta_{int} = \arctan\left(\frac{\frac{D}{2}}{rg_V - \frac{LE}{2}}\right) \quad (3.20)$$

$\theta_{ext}$  ângulo de giro dos conjuntos das rodas externas

$\theta_{int}$  ângulo de giro dos conjuntos das rodas internas  
demais variáveis relacionadas anteriormente

Estas relações permitem a determinação dos raios de giro das rodas externas e internas ( $rg_{int}$ ,  $rg_{ext}$ ) em função das dimensões características do veículo ( $D$ ,  $LE$ ,  $LR$ ) e do raio de giro do centro geométrico do veículo ( $rg_V$ ).

Como  $D$ ,  $LE$  e  $LR$  são valores fixos,  $rg_{ext}$ ,  $rg_{int}$ ,  $\theta_{ext}$  e  $\theta_{int}$  dependem apenas do raio de giro do veículo. Convém recordar que todos os raios ( $rg_v$ ,  $rg_{int}$ ,  $rg_{ext}$ ) estão relacionados ao centro instantâneo de giro do veículo ( $C/G$ ), que  $rg_{ext} > rg_v > rg_{int}$  e que  $\theta_{ext} < \theta_{int}$ . Além disto, um raio de giro infinito resultaria em  $\theta_{ext} = \theta_{int} = 0$ , o que recai na situação de movimento em linha reta.

### 3.2.12 Raio de giro mínimo no modo curva

Os mecanismos empregados para transmitir movimento para as rodas tratoras possuem, na prática, um ângulo limite para realizar esta função. Como o giro das rodas internas é maior que o giro das rodas externas, o raio mínimo de giro no modo curva pode ser estimado a partir do máximo ângulo de giro em que os mecanismos de direção da roda funcionam de forma satisfatória ( $\theta_{MAX}$ ) e da fórmula que relaciona  $\theta_{int}$  e  $rg_v$ .

$$\tan \theta_{int} = \frac{\frac{D}{2}}{rg_v - \frac{LE}{2}} \quad (3.21)$$

$$\tan \theta_{MAX} = \frac{\frac{D}{2}}{rg_{VMIN} - \frac{LE}{2}} \quad (3.22)$$

$$rg_{VMIN} = \frac{D}{2 \tan \theta_{MAX}} + \frac{LE}{2} \quad (3.23)$$

### 3.2.13 Sobre o controle dos motores de passo das rodas tratoras no modo movimento em curva

No modo curva o parâmetro *distância em curva* ( $d_{curva}$ ) está associado ao raio de giro do veículo ( $rg_v$ ) e ao arco percorrido pelo centro geométrico do veículo (CGV) rotacionando em torno do centro instantâneo de giro (CIG).

Como todas as rodas são de mesmo diâmetro, o número de passos de cada motor necessário à execução das funções de movimento em curva nas rodas tratoras internas e externas pode ser determinado considerando-se (a) as proporções entre os raios de giro no modo curva, (b) o fato de que as distâncias percorridas e as velocidades tangenciais (tanto do centro geométrico do veículo quanto das rodas tratoras internas e externas) são diretamente proporcionais aos respectivos raios de curvatura em torno do CIG e (c) que o centro geométrico do veículo está relacionado ao parâmetro  $d_{curva}$  e à velocidade tangencial V. O resultado pode ser expresso como:

$$n_{ext} = \frac{rg_{ext}}{rg_v} \cdot \left( \frac{\frac{d_{curva}}{R}}{\frac{\phi_{mp}}{k_{mp}}} \right) \quad rg_{ext} = \sqrt{\left( rg_v + \frac{LE}{2} \right)^2 + \left( \frac{D}{2} \right)^2} + LR \quad (3.24)$$

$$n_{int} = \frac{rg_{int}}{rg_v} \cdot \left( \frac{\frac{d_{curva}}{R}}{\frac{\phi_{mp}}{k_{mp}}} \right) \quad rg_{int} = \sqrt{\left( rg_v - \frac{LE}{2} \right)^2 + \left( \frac{D}{2} \right)^2} - LR \quad (3.25)$$

$n_{ext}$  número de passos dos motores das rodas tratoras externas  
associado aos parâmetros ( $d_{curva}, rg_v$ )

$n_{int}$  número de passos dos motores das rodas tratoras internas  
associado aos parâmetros ( $d_{curva}, rg_v$ )

ou, alternativamente, como:

$$n_{ext} = \frac{d_{curva}}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \cdot \frac{rg_{ext}}{rg_v} = \frac{d_{curva}}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \cdot \frac{\sqrt{\left(rg_v + \frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} + LR}{rg_v} \quad (3.26)$$

$$n_{int} = \frac{d_{curva}}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \cdot \frac{rg_{int}}{rg_v} = \frac{d_{curva}}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \cdot \frac{\sqrt{\left(rg_v - \frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - LR}{rg_v} \quad (3.27)$$

Com o VLTC realizando uma curva com velocidade constante as correspondentes freqüências de excitação dos motores de passo seriam:

$$f_{ext} = \frac{V}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \cdot \frac{rg_{ext}}{rg_v} = \frac{V}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \cdot \frac{\sqrt{\left(rg_v + \frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} + LR}{rg_v} \quad (3.28)$$

$$f_{int} = \frac{V}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \cdot \frac{rg_{int}}{rg_v} = \frac{V}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \cdot \frac{\sqrt{\left(rg_v - \frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} - LR}{rg_v} \quad (3.29)$$

$f_{ext}$  freqüência de excitação dos motores das rodas tratoras externas  
associado aos parâmetros  $(d_{curva}, rg_v)$

$f_{int}$  freqüência de excitação motores das rodas tratoras internas associado  
aos parâmetros  $(d_{curva}, rg_v)$

$V$  Velocidade tangencial do centro geométrico do veículo (CGV)

Convém observar que  $\theta = 0$  resulta em:

$$n_{ext} = n_{int} = n \quad (3.30)$$

$$f_{ext} = f_{int} = f \quad (3.31)$$

que recai no modo movimento em linha reta, onde todas as rodas tratoras são comandadas da mesma maneira.

### 3.2.14 Giro do VLTC sobre o próprio eixo

O movimento de giro do VLTC em torno do próprio eixo (quadro 3.4 e figura 3.17) amplia a capacidade de realizar manobras (inclusive eventuais manobras evasivas), especialmente em áreas onde os espaços disponíveis para manobra sejam restritos.

A função *GIRO*, sem parâmetros, posiciona as rodas do VLTC a fim de prepará-lo para um giro em torno do próprio eixo. A função *GIROD*( $\varphi$ ) rotaciona o VLTC para direita em torno do CGV e a função *GIROE*( $\varphi$ ) realiza procedimento semelhante para a esquerda.

<i>GIRO</i>	Posiciona as rodas para giro sobre o próprio eixo
<i>GIROD</i> ( $\varphi$ )	<b>GIRO</b> do VLTC para a <b>Direita</b>
<i>GIROE</i> ( $\varphi$ )	<b>GIRO</b> do VLTC para a <b>Esquerda</b>

QUADRO 3.4 – FUNÇÕES DE GIRO DO VLTC  
FONTE: Autor (2011)

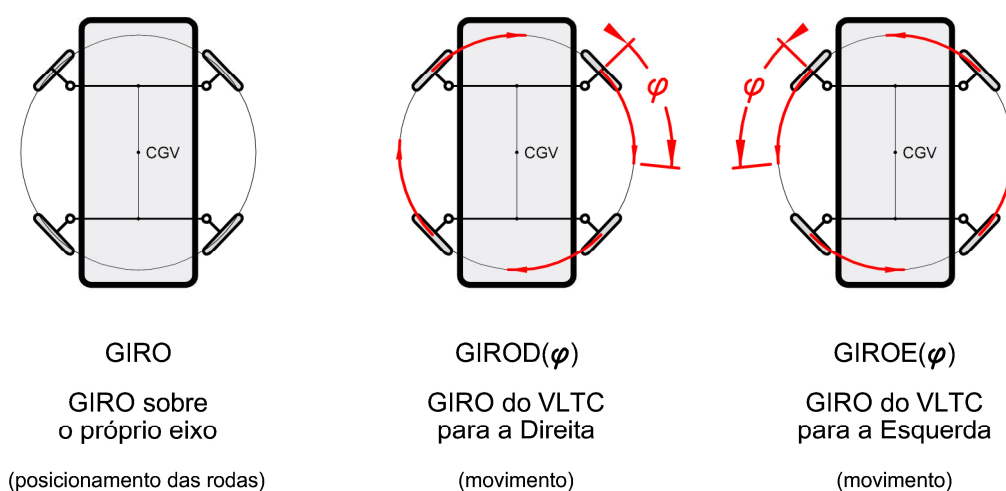


FIGURA 3.17 – FUNÇÕES GIRO, GIROD( $\varphi$ ) E GIROE( $\varphi$ )  
FONTE: Autor (2012)

### 3.2.15 Implicações da função GIRO nas dimensões características do VLTC

Para que o VLTC gire sobre o próprio eixo de forma satisfatória (figura 3.18) é necessário que (a) todas as rodas estejam alinhadas com o centro geométrico do veículo e que (b) o ângulo de giro dos mecanismos das rodas seja menor ou igual ao ângulo máximo ( $\theta_{MAX}$ ) em que seus mecanismos de direção funcionam de forma satisfatória na transmissão de movimento.

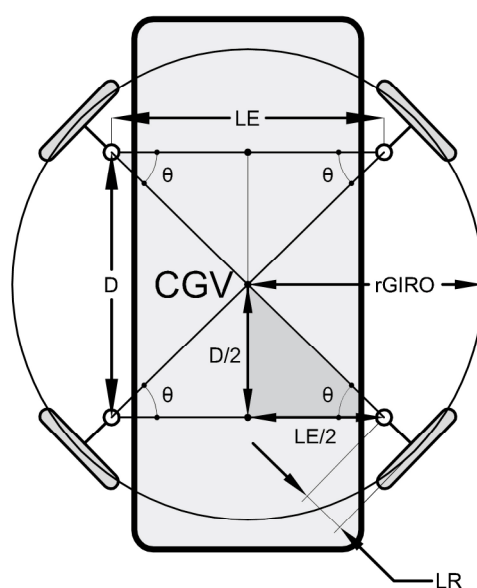


FIGURA 3.18 – GEOMETRIA FUNCIONAL DO VLTC NAS FUNÇÕES DE GIRO  
FONTE: Autor (2012)

Da geometria funcional do VLTC no modo GIRO tem-se que:

$$r_{GIRO} = \sqrt{\left(\frac{LE}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2} + LR \quad (3.32)$$

$$\tan \theta = \frac{D/2}{LE/2} = \frac{D}{LE} \quad (3.33)$$

$$\theta \leq \theta_{MAX} \quad (3.34)$$

$$\tan \theta \leq \tan \theta_{MAX} \quad (3.35)$$

$$\frac{D}{LE} \leq \tan \theta_{MAX} \quad (3.36)$$

Conseqüentemente, para que o VLTC possa girar horizontalmente sobre o seu centro geométrico, a largura do eixo ( $LE$ ) dever ser suficientemente longa em comparação com a distância entre eixos ( $D$ ) para atender a seguinte condição:

$$LE \geq \frac{D}{\tan \theta_{MAX}} \quad (3.37)$$

Outra forma de expressar esta condição é dizer que "a distância entre eixos deve ser suficientemente curta" para que:

$$D \leq LE \tan \theta_{MAX} \quad (3.38)$$

### 3.2.16 Sobre o controle dos motores de passo das rodas tratoras no modo GIRO

Para efetuar um giro em torno do próprio eixo todas as rodas do VLTC percorrem uma mesma distância em curva:

$$d_{curva} = r_{GIRO} \cdot \varphi \quad (3.39)$$

Como todas as rodas tratoras possuem raio  $R$ , esta distância pode ser obtida pela aplicação do seguinte número de passos aos motores:

$$n = \left( \frac{\frac{d_{curva}}{R}}{\frac{\phi_{mp}}{k_{mp}}} \right) = \frac{d_{curva}}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \quad (3.40)$$

$$n = \left[ \frac{\left( \sqrt{\left( \frac{LE}{2} \right)^2 + \left( \frac{D}{2} \right)^2} + LR \right) \cdot \varphi}{R} \right] \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \quad (3.41)$$

$$n = \left( \frac{\sqrt{\left( \frac{LE}{2} \right)^2 + \left( \frac{D}{2} \right)^2} + LR}{R} \cdot \frac{k_{mp}}{\phi_{mp}} \right) \cdot \varphi \quad (3.42)$$

Esta última fórmula evidencia que o número de passos é diretamente proporcional ao valor do ângulo de giro ( $\varphi$ ) e pode ser expresso pela multiplicação do ângulo de giro desejado por uma constante vinculada à geometria do VLTC, às características do motor de passo e sua respectiva caixa de redução.

### 3.2.17 Sobre os controles de direção

Para realizar as funções de posicionamento das rodas e de movimentação previstas para o VLTC é necessário que cada uma das quatro rodas possa ser controlada de forma independente no que diz respeito à direção.



O controle de direção de cada roda (mostrado esquematicamente na figura 3.2 e com detalhes construtivos nas figuras 3.9 e 3.19) é feito por um servomotor de posição posicionado na plataforma do VLTC e conectado ao conjunto da roda por meio de um braço de direção com dois terminais oscilantes (juntas tipo rótula radial). A variável de controle de cada servomotor é um sinal PWM (*Pulse Width Modulation* / Modulação por Largura de Pulso) cuja largura de pulso determina diretamente o ângulo de giro do braço do servo. O braço do servo controla o braço da roda por meio do braço da direção.

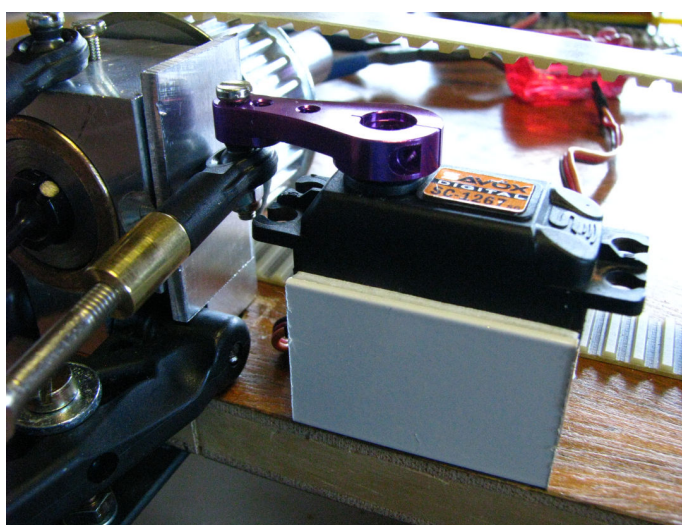


FIGURA 3.19 – CONJUNTO DA RODA, BRAÇO AJUSTÁVEL E SERVOMOTOR DE POSIÇÃO  
FONTE: Autor (2013)

A partir da geometria funcional do VLTC, é possível considerar o movimento da cada roda (ou, de forma mais exata, o movimento do conjunto de mecanismos de direção de cada roda) como de rotação horizontal em torno da respectiva ponta do eixo. O ponto em torno do qual acontece esta rotação será doravante denominado de *Centro de Giro da Roda* (CGR). Convém recordar que o valor de  $LR$  (uma das dimensões características da geometria funcional do VTLC e que mede o raio de giro do conjunto da roda no centro efetivo da banda de rodagem do pneu) é medido em relação ao CGR.

Para cada uma das quatro rodas, a direção de referência é paralela ao eixo de simetria do VLTC no sentido de seu comprimento e passante pelo respectivo CGR. Esta direção de referência é associada ao ângulo  $\theta = 0^\circ$ .

O quadro 3.5 resume as relações entre os valores absolutos dos ângulos de giro para as diferentes funções de posicionamento das rodas e anteriormente descritas ao longo da seção 3.2, O sentido de giro de cada roda varia conforme a função a ser usada.

<b>FUNÇÃO</b>	<b>Descrição</b>	<b>Relação entre os ângulos de giro de cada roda (em valores absolutos)</b>	<b>Posicionamento relativo das rodas</b>
<i>LR</i>	Posiciona as rodas para movimento em <b>Linha Reta</b> e na direção do eixo principal do veículo	$\theta_{DF} = \theta_{DR} = \theta_{EF} = \theta_{ER} = 0$	Paralelas ao eixo longitudinal do VLTC
<i>DLD</i> ( $\theta$ )	<b>Desvio Lateral para a Direita</b>	$\theta_{DF} = \theta_{DR} = \theta_{EF} = \theta_{ER} = \theta$	Paralelas
<i>DLE</i> ( $\theta$ )	<b>Desvio Lateral para a Esquerda</b>	$\theta_{DF} = \theta_{DR} = \theta_{EF} = \theta_{ER} = \theta$	Paralelas
<i>CD</i> ( $rg_V$ )	<b>Curva para a Direita</b>	$\theta_{DF} = \theta_{DR} = \theta_{int} = f(rg_V)$ $\theta_{EF} = \theta_{ER} = \theta_{ext} = g(rg_V)$ $\theta_{int} > \theta_{ext}$	Convergem para o CIG
<i>CE</i> ( $rg_V$ )	<b>Curva para a Esquerda</b>	$\theta_{DF} = \theta_{DR} = \theta_{ext} = f(rg_V)$ $\theta_{EF} = \theta_{ER} = \theta_{int} = g(rg_V)$ $\theta_{int} > \theta_{ext}$	Convergem para o CIG
<i>GIRO</i>	Posiciona as rodas para <b>GIRO</b> sobre o próprio eixo	$\theta_{DF} = \theta_{DR} = \theta_{EF} = \theta_{ER} = \varphi_{GIRO}$	Convergem para o CGV

QUADRO 3.5 – RELAÇÃO ENTRE OS ÂNGULOS DE GIRO PARA CADA FUNÇÃO DE POSICIONAMENTO DAS RODAS  
FONTE: Autor (2012)

### 3.2.18 Correção de não-linearidade nos controles de direção

O *ângulo de giro do conjunto da roda* ( $\theta_{RODA}$ ) é a variável que efetivamente interessa ao controle de direção por meio de *software*, mas, em geral, (1) é inviável controlá-la diretamente e (2) a relação entre esta variável final e a saída proporcionada por um servomotor de posição<sup>21</sup> ( $\theta_{SERVO}$ ) não é uma função linear.

Apesar de não-linear, *esta relação entre  $\theta_{RODA}$  e  $\theta_{SERVO}$  é uma função bijetora* (e que, portanto, admite uma função inversa), *o que abre um caminho para a correção de não-linearidade.*

Como a variável *ângulo de giro do servomotor* ( $\theta_{SERVO}$ ) é uma função linear da variável de controle recebida da plataforma Matlab ( $PW_{ENTRADA\_DO\_SERVO}$  – *Pulse Width / Largura de Pulso*) convém que a correção seja realizada no próprio ambiente Matlab antes do envio para o servo, o que pode ser feito através de uma variável auxiliar antecedente ( $\theta_{CONTROLE\_AUXILIAR\_DO\_SERVO}$ ) em cujo valor esteja embutida a correção necessária. A adoção de uma nomenclatura para distinguir  $\theta_{RODA}$  nas duas pontas do processo completo permite expressá-lo da seguinte forma:

$$\theta_{RODA\_NO\_VLTC} = f(\theta_{SERVO}) \quad (3.43)$$

$$\theta_{SERVO} = g(PW_{CONTROLE\_DIRETO\_DO\_SERVO}) \quad (3.44)$$

$$PW_{CONTROLE\_DIRETO\_DO\_SERVO} = h(\theta_{CONTROLE\_AUXILIAR\_DO\_SERVO}) \quad (3.45)$$

$$\theta_{CONTROLE\_AUXILIAR\_DO\_SERVO} = i(\theta_{RODA\_ESPERADO}) \quad (3.46)$$

- f      função não-linear / depende da geometria do VLTC;
- g      função linear / depende do modelo do servomotor;
- h      função linear / depende do modelo do servomotor;
- i      função não-linear / usada para gerar a correção de não-linearidade.

---

<sup>21</sup> No caso, usou-se a expressão servomotor de posição em um sentido amplo, que englobaria qualquer dispositivo capaz de prover um ângulo de giro ou um deslocamento linear diretamente proporcional a uma variável de entrada (o formato disponível, digital ou analógico, não vem ao caso).

A composição das funções pode ser expressa por:

$$\theta_{RODA\_NO\_VLTC} = f(g(h(i(\theta_{RODA\_ESPERADO})))) \quad (3.47)$$

Idealmente a composição das quatro funções resultaria na função identidade :

$$\theta_{RODA\_NO\_VLTC} = fogohoi(\theta_{RODA\_ESPERADO}) = \theta_{RODA\_ESPERADO} = \theta_{RODA} \quad (3.48)$$

$$\theta_{RODA} = fogohoi(\theta_{RODA}) \quad (3.49)$$

A separação da função  $i$  e a composição das outras três funções permite expressar a equação anterior como:

$$\theta_{RODA} = fogoh(i(\theta_{RODA})) \quad (3.50)$$

Para que a função resultante seja a função identidade, a função  $i$  tem de ser a função inversa da função composta  $fogoh$ :

$$\theta_{RODA} = fogoh((fogoh)^{-1}(\theta_{RODA})) \quad (3.51)$$

$$i = (fogoh)^{-1} \quad (3.52)$$

Como  $h$  e  $g$  são funções lineares, a chave para a obtenção da função de correção  $i$  é o conhecimento da função  $f$ , ou seja, a relação entre  $\theta_{RODA}$  e  $\theta_{SERVO}$  – que poder ser determinada experimentalmente ou, se possível, modelada matematicamente.

Na prática, testes semi-empíricos mostraram que a relação entre o ângulo de giro do servomotor e o ângulo de giro da roda se revelou bastante linear para valores até 20° e com progressiva e acentuada não linearidade para valores maiores. Com base nisto, tomou-se a decisão de usar o valor 20° como um limite prático na programação das funções de veículo e de implementar correções de não linearidade em futuras aplicações.

### 3.3 COMUNICAÇÃO ENTRE A UCP E A UCL

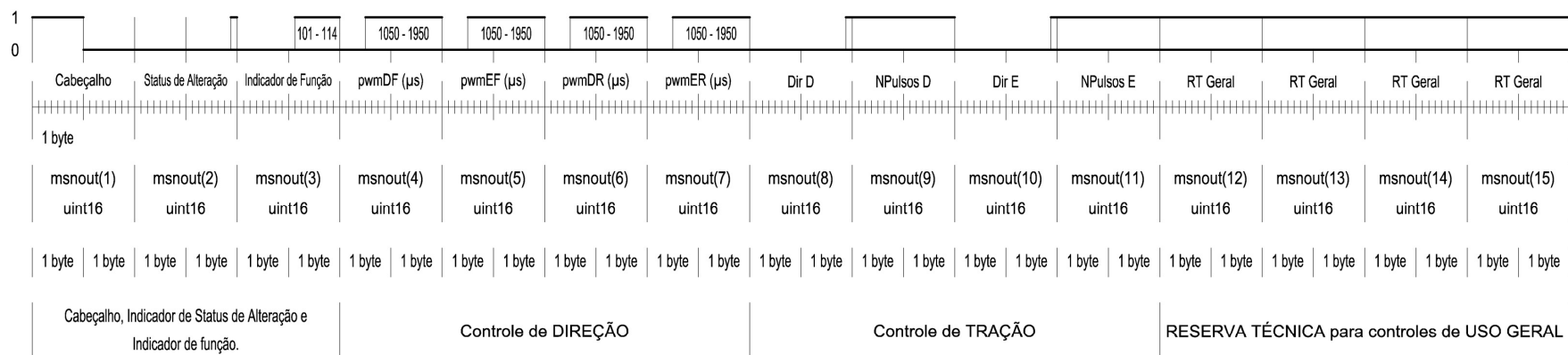
A maior parte do processamento necessário à realização do levantamento pretendido é realizado pela *Unidade de Controle Principal* enquanto que a *Unidade de Controle Local* realiza tarefas típicas de sistemas microcontrolados – controle de servomotores via sinais PWM, controles de motores de passo e conversão analógico-digital (no caso, dos sinais oriundos do acelerômetro triaxial usado como sensor de inclinação).

#### 3.3.1 Estrutura geral das mensagens

A troca de informações entre a UCP e a UCL acontece de forma sistemática através de uma *Mensagem de Comando* e de uma *Mensagem de Retorno*. Para organizar a troca de informações, no Matlab as informações de cada mensagem – tanto a de comando quanto a de retorno – são organizadas na forma de um vetor com uma seqüência de 15 variáveis tipo *uint16* (*unsigned int / 16 bits*) reunidas em um bloco de 30 *bytes* (2 *bytes* por variável). A estrutura geral de cada mensagem encontra-se representada na figura 3.20.

Para a realização prática das funções de posicionamento das rodas a UCP (ambiente *Matlab*) transforma a função em execução (uma função de alto nível) em uma seqüência de 4 variáveis tipo *uint16* (números inteiros, sem sinal, entre 0 e  $65535 = 2^{16} - 1$ ) que informam diretamente a largura do sinal PWM (em microssegundos) necessário ao correspondente posicionamento de cada servomotor do sistema de direção (já com a devida correção de não-linearidade entre  $\theta_{RODA}$  e  $\theta_{SERVO}$ ). Por exemplo, na função LR a largura de pulso do sinal PWM correspondente à posição neutra do servomotor ( $\theta_{RODA} = 0^\circ$ ) é de 1500 $\mu$ s. A sensibilidades dos servomotores empregados é de 0,1 $^\circ/\mu$ s. A geração dos sinais PWM será comentada adiante, na seção 3.4.2.

### MENSAGEM DE COMANDO (15 variáveis tipo uint16 (Matlab) / total de 30 bytes) - Vai da UCP para a UCL no VLTC



### MENSAGEM DE RETORNO (15 variáveis tipo uint16 (Matlab) / total de 30 bytes) - Vem da UCL para a UCP

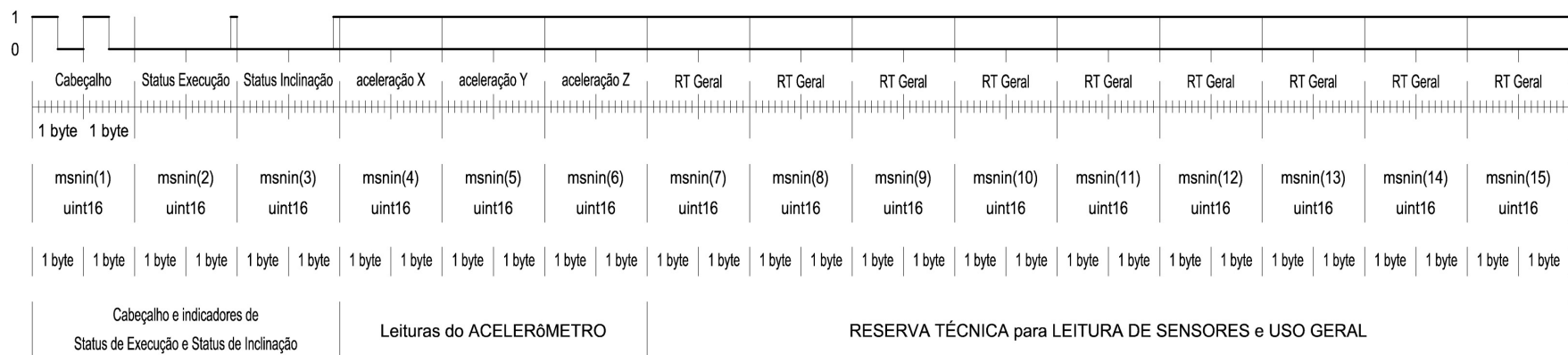


FIGURA 3.20 – ESTRUTURA DA MENSAGEM DE COMANDO E DA MENSAGEM DE RETORNO  
FONTE: Autor (2013)

O quadro 3.6 mostra uma sinopse das funções de posicionamento das rodas de forma a evidenciar a relação de cada servomotor com sua principal variável do ponto de vista funcional.

Grupos de funções		Funções de posicionamento das rodas para movimento em linha reta			Funções de giro	Funções de posicionamento das rodas para movimento em curva	
		LR	DLD	DLE	GIRO	CD	CE
S E R V I C I O	DF	0	$\theta$	$\theta$	$\theta_{GIRO}$	$\theta_{int}$	$\theta_{ext}$
	DR	0	$\theta$	$\theta$	$\theta_{GIRO}$	$\theta_{int}$	$\theta_{ext}$
	EF	0	$\theta$	$\theta$	$\theta_{GIRO}$	$\theta_{ext}$	$\theta_{int}$
	ER	0	$\theta$	$\theta$	$\theta_{GIRO}$	$\theta_{ext}$	$\theta_{int}$
Observações		Posição de referência	Parâmetro único	Parâmetro único	Parâmetro único (com valor fixo)	$\theta_{int} > \theta_{ext}$ $\theta_{int} = f(rg_v)$ $\theta_{ext} = g(rg_v)$	$\theta_{int} > \theta_{ext}$ $\theta_{int} = f(rg_v)$ $\theta_{ext} = g(rg_v)$

QUADRO 3.6 – FUNÇÕES DE CONTROLES DO SISTEMA DE DIREÇÃO (EM ALTO NÍVEL)  
FONTE: Autor (2012)

Para os dois motores de passo do sistema de tração (TD e TE) a sinopse do controle em alto nível encontra-se no quadro 3.7 (que mostra o ângulo de giro efetivo de cada motor já considerando sua caixa de redução). Do ponto de vista de cada um dos respectivos *drivers* a realização prática das funções requer (a) a geração de um sinal binário e (b) de um trem de pulsos (o valor do sinal define o sentido de giro do motor e a quantidade de pulsos define o ângulo de giro). Na UCP (ambiente Matlab) cada função de alto nível para a tração é transformada em um conjunto de 4 variáveis tipo *uint16* que informam diretamente o sentido de giro de cada motor de tração e o correspondente número de passos a ser aplicado (a questão de sincronização dos motores de tração é resolvida pela UCL e será comentada na seção 3.4.4).

Grupos de funções		Funções de movimento em linha reta		Funções de giro		Funções de movimento em curva			
		$F(d_{reta})$	$R(d_{reta})$	$GIROD(\varphi)$	$GIROE(\varphi)$	$FCD$	$FCE$	$RCD$	$RCE$
MOTOR	TD	$\frac{d_{reta}}{R}$	$\frac{d_{reta}}{R}$	$\varphi \cdot \frac{r_{GIRO}}{R}$	$\varphi \cdot \frac{r_{GIRO}}{R}$	$\frac{d_{int}}{R}$	$\frac{d_{ext}}{R}$	$\frac{d_{int}}{R}$	$\frac{d_{ext}}{R}$
	TE	$\frac{d_{reta}}{R}$	$\frac{d_{reta}}{R}$	$\varphi \cdot \frac{r_{GIRO}}{R}$	$\varphi \cdot \frac{r_{GIRO}}{R}$	$\frac{d_{ext}}{R}$	$\frac{d_{int}}{R}$	$\frac{d_{ext}}{R}$	$\frac{d_{int}}{R}$
Observações		Parâmetro único		Parâmetro único ( $\varphi$ determina uma distância)		$d_{ext} > d_{int}$ $d_{ext} = f(d_{curva}, rg_v)$ $d_{int} = g(d_{curva}, rg_v)$			

QUADRO 3.7 FUNÇÕES DE CONTROLES DO SISTEMA DE TRAÇÃO (EM ALTO NÍVEL)  
 FONTE: Autor (2012)

### 3.3.2 Estrutura da mensagem de comando (UCP-UCL)

A estrutura da *Mensagem de Comando* (da UCP / Matlab para a UCL), também denominada doravante de *Mensagem de Saída*, é composta dos seguintes blocos de informação:

- *Cabeçalho*: definido pela sequência de bits  $1111111100000000_2$  ( $65280_{10}$ ) que caracteriza o início efetivo da mensagem;
- Um *Indicador de Status de Alteração* da mensagem de saída, que informa se ela é igual à mensagem anterior (nível 0) ou se é diferente (nível 1);



- Um *Indicador de Função* que informa explicitamente a tarefa a ser executada pela UCL;
- Um *bloco de 4 variáveis relacionadas à direção* com as 4 larguras de pulsos dos sinais PWM (em microssegundos) a serem aplicados aos servomotores (que, no caso do VLTC desenvolvido, variam de 1050 a 1950  $\mu\text{s}$ <sup>22</sup>);
- Um *bloco de 4 variáveis relacionadas à tração* com os sentidos de giro e números de pulsos a serem aplicados aos motores de tração dos lados direito e esquerdo (TD e TE);
- Um último *bloco com 4 variáveis de reserva técnica de uso geral* para uso futuro – por exemplo, sinais de controle de câmeras, sensores ou quaisquer outros equipamentos empregados em aplicações que venham a fazer uso da plataforma do VLTC. Estas variáveis também pode ser usadas para controlar parâmetros de velocidade e de aceleração em aplicações futuras.

A inclusão do indicador de função na mensagem de comando torna a estrutura da mensagem mais objetiva e mais robusta porque permite, na UCL:

- O uso de um controle de fluxo baseado numa estrutura *switch / case / default* onde o indicador de função é usado como *switch*, os *cases* correspondem às funções e a opção *default* pode ser usada para tratar eventuais opções inválidas;
- A inclusão de rotinas para verificar a coerência das informações nos blocos de controle de direção e de controle de tração. Por exemplo, a função *LR* (posicionamento das rodas em Linha Reta) usa o indicador 101 e exige que  $pwmDF = pwmEF = pwmDR = pwmER = 1500$  (ver seção 3.4.2) e também que  $NPulsosD = NPulsosE = 0$ .

---

<sup>22</sup> No caso do VLTC, estes são os maiores desvios em relação à posição neutra do servo (largura de pulso 1500 $\mu\text{s}$ ) e foram usados especificamente na implementação das funções GIRO, GIROD e GIROE.

No quadro 3.8 encontram-se os indicadores associados às funções do VLTC descritas nas seções anteriores. Os valores 101 a 114 permitem que indicadores de função possam ser numericamente distinguidos do cabeçalho (65280), do indicador do status de alteração (0 ou 1), dos valores dos sinais PWM (1050-1950) e dos sinais DirD e DirE (0 ou 1).

<b>Indicador de função</b>	<b>Função correspondente</b>
101	LR
102	DLD
103	DLE
103	GIRO
105	CD
106	CE
107	F
108	R
109	FCD
110	FCE
111	RCD
112	RCE
113	GIROD
114	GIROE

QUADRO 3.8 – INDICADORES DE FUNÇÃO ADOTADOS NA UCP E NA UCL  
FONTE: Autor (2013)

A UCL é baseada numa plataforma Arduino e será comentada na seção 3.4.

### 3.3.3 Estrutura da mensagem de retorno (UCL-UCP)

A estrutura da *Mensagem de Retorno* (da UCL / Arduino para a UCP / Matlab), também denominada doravante de *Mensagem de Entrada*, é composta de:

- *Cabeçalho*: definido pela sequência de bits  $111100011110000_2$  ( $61680_{10}$ ) que caracteriza o início efetivo da mensagem;
- Um indicador de *Status de Execução* da mensagem de saída, que informa se a tarefa enviada já foi completada (nível lógico 1) ou encontra-se em execução (nível 0);
- Um indicador de *Status de Inclinação* que informa se as variações de inclinação justificam uma coleta adicional de dados pela ETR (nível 1) ou se estão dentro das variações admissíveis (nível 0);
- Um bloco de 3 *variáveis com as componentes X, Y, Z do acelerômetro*;
- Um bloco de 9 *variáveis de reserva técnica geral* para possíveis usos futuros – por exemplo, informações sobre sinais oriundos de dispositivos MEMS como giroscópios e magnetômetros triaxiais devidamente convertidos para formato digital, indicadores de *status* de equipamentos diversos etc.

Embora a maior parte da mensagem de retorno seja composta de variáveis de reserva técnica, isto acrescenta versatilidade à plataforma desenvolvida e evita (ou pelo menos facilita) alterações no sistema de troca de informações entre a UCP e a UCL em trabalhos futuros.

Durante parte do desenvolvimento dos programas de controle do levantamento na UCP (ambiente Matlab) e na UCL (Arduino), as nove variáveis de reserva técnica da mensagem de retorno foram usadas para reenviar o conteúdo de `msnout(3)` a `msnout(11)` da UCL para a UCP (a sequência de variáveis desde o indicador de função até `NPulsosE`) e, desta forma, conferir se o sistema de comunicação *wireless* entre a UCP e a UCL está operando corretamente.

### 3.3.4 Sobre o meio de comunicação

Como meio de comunicação UCP-UCL foram utilizados módulos *XBee*<sup>23</sup> – no caso operando em modo ponto-a-ponto (RAMOS, 2012). No computador da UCL um módulo *XBee Series 1* é conectado à uma porta USB através de um módulo *XBee Explorer* que, via *firmware*, emula uma porta de comunicação serial. No lado da UCL outro módulo *XBee Series 1* (potência de transmissão 1mW / 0 dBm, sensibilidade de recepção -92dBm) (DIGI, 2013a) é conectado ao *Arduino UNO* usado na UCL através de um *shield*<sup>24</sup> de uso específico (figura 3.21).

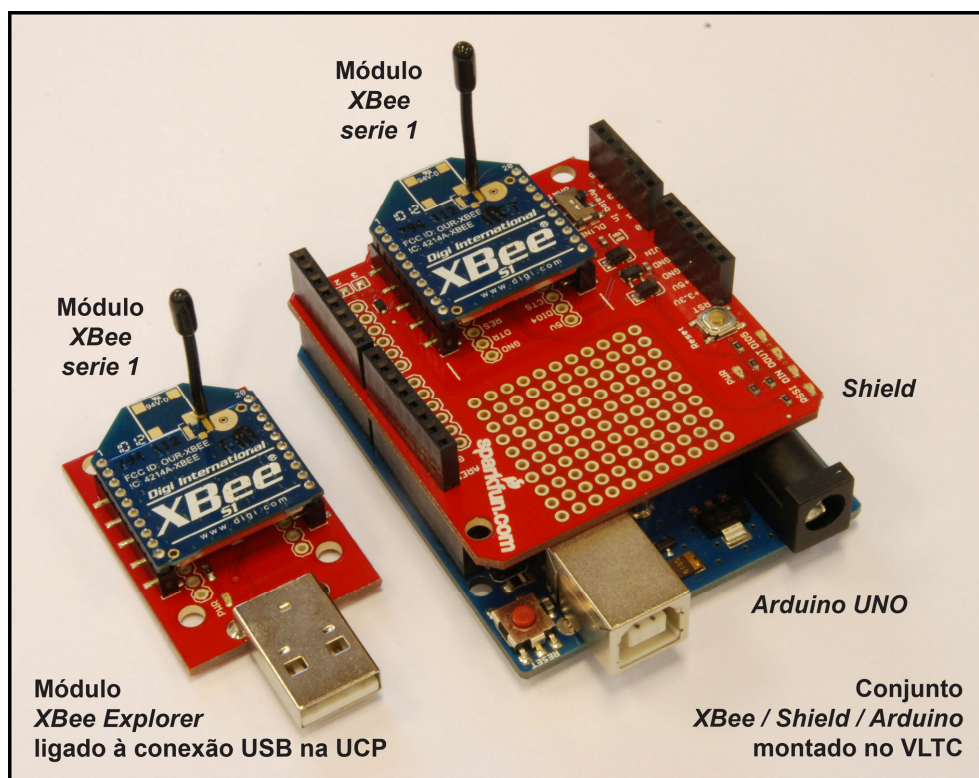


FIGURA 3.21 – HARDWARE ASSOCIADO À COMUNICAÇÃO ENTRE A UCP E A UCL  
FONTE: Autor (2013)

<sup>23</sup> De forma sucinta, *XBee* é um marca comercial que designa uma família de diversos módulos de rádio fabricados pela empresa *Digi International* para comunicação de dados através de protocolos específicos – por exemplo, o IEEE 802.15.4.

<sup>24</sup> *Shield* é uma designação genérica para módulos e placas compatíveis pino a pino com um módulo específico da família Arduino e que se encaixam diretamente sobre ele, formando um "escudo" (*shield*) aparente. A expressão se popularizou a ponto de designar tecnicamente estes dispositivos.

O alcance nominal dos módulos usados é de até 90 metros em ambientes com visada RF livre, o que é suficiente para os testes de campo realizados neste trabalho<sup>25</sup>.

Os módulos XBee foram programados através do software X-CTU (DIGI, 2013b). Com exceção do parâmetro *baud rate*, redefinido para 4800 bps, os demais parâmetros foram mantidos na configuração típica (*flow control: none, databits: 8, parity: none, 1 stop bit*). Os endereços de 16 bits dos módulos (que permitem a diferenciação em ambientes onde múltiplos módulos XBee devem operar sem interferência mútua) foram definidos como 5002 para o módulo XBee da UCP e 5001 para o da UCL (endereços expressos em base decimal).

Duas APIs (*Application Programming Interface*) – uma incorporada ao Matlab e outra ao Arduino software – gerenciam sistematicamente as mensagens de comando e de retorno trocadas entre a UCP e a UCL. Foge ao escopo deste trabalho uma discussão detalhada dos protocolos e processos de comunicação serial e dos módulos XBee, mas cabe comentar que ela acontece essencialmente através de pacotes de bytes.

Por este motivo, na comunicação Matlab → Arduino (figura 3.22) cada uma das 15 variáveis da mensagem de comando (variáveis tipo `unit16` no ambiente Matlab) é convertida em dois bytes e o vetor linha com os 30 bytes resultantes é então transmitido. No Arduino o vetor recebido é remontado, de dois em dois bytes, a fim de reconstituir as 15 variáveis da mensagem de comando no interior do Arduino. Na comunicação Arduino → Matlab o processo aplicado à mensagem de retorno é semelhante. A figura 3.22 ilustra o processo descrito.

---

<sup>25</sup> Este alcance pode ser ampliado pela substituição direta dos módulos empregados por outros módulos XBee funcionalmente equivalentes, mas de maior potência e sensibilidade – por exemplo, os módulos XBee *PRO series 1* (potência +10 dBm, sensibilidade -100dBm) proporcionariam alcance de até 1km (em visada RF livre).

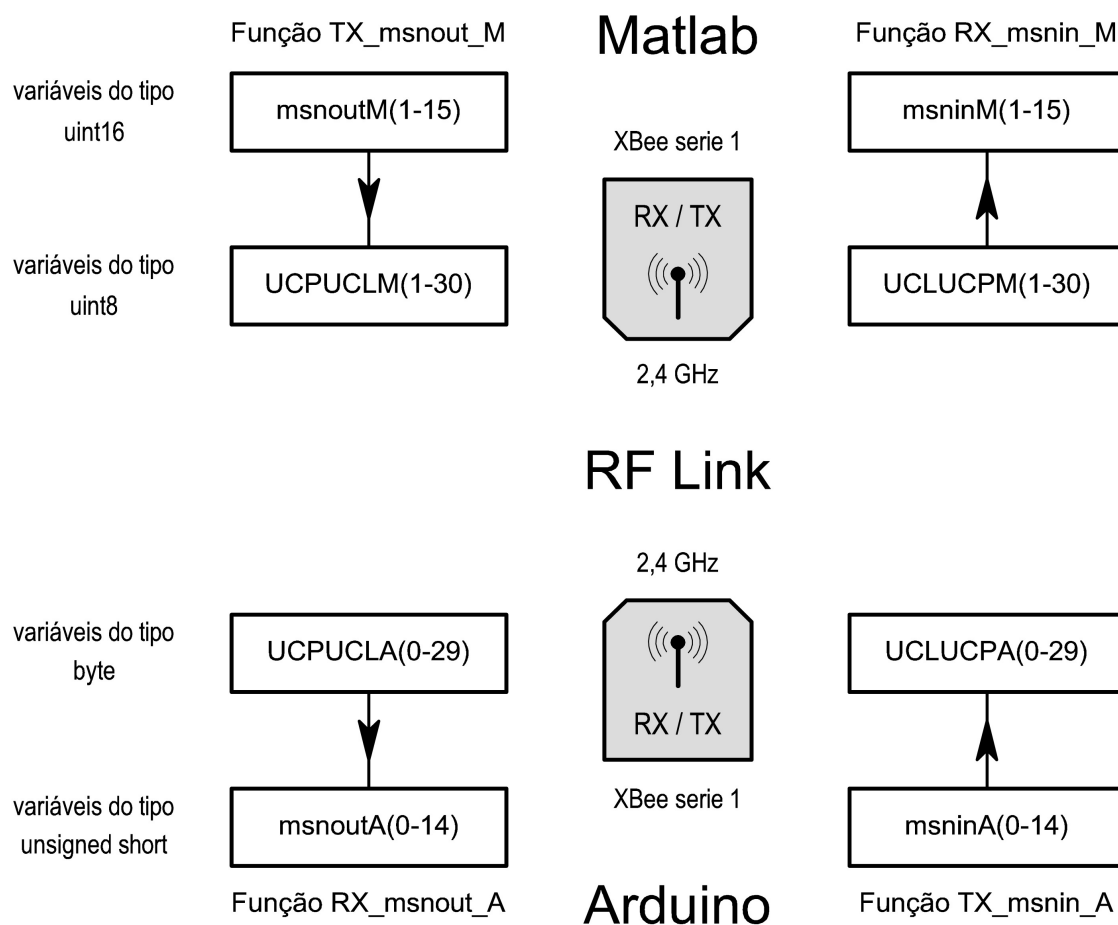


FIGURA 3.22 – VISÃO GERAL DO FLUXO DAS VARIÁVEIS DA MENSAGEM DE COMANDO (SAÍDA) E DA MENSAGEM DE RETORNO (ENTRADA)  
FONTE: Autor (2013)

Quanto aos programas e funções desenvolvidos para incorporar esta comunicação via XBee ao sistema desenvolvido, cabe ainda citar que:

- Tanto no Arduino quanto no Matlab os comandos necessários ao processo necessitam a prévia incorporação de bibliotecas XBee específicas em cada programa e a criação dos correspondentes objetos;
- O Matlab deve ser versão 7.10.0 (2010a) ou superior, o software Java deve estar instalado e os arquivos com extensão *jar* usados como argumento em comandos *javaaddpath* devem estar disponíveis no mesmo diretório onde se encontra o programa de inicialização;

- A nomenclatura adotada pelo Matlab e pelo Arduino (Cujas linguagem de programação é um subconjunto do C/C++) para cada tipo de variável envolvida é diferente. O mesmo acontece com a forma de indexação das componentes de uma variável vetorial (um vetor com N componentes é indexado de 1 a N no Matlab e de 0 a N-1 em C/C++). A figura 3.22 também oferece uma visão geral de todas estas diferenças.

Sem a realização de outras tarefas de processamento (por parte do MatLab, do Arduino e dos módulos XBee) e num modo de operação puramente serial, a transmissão da mensagem de saída (30 bytes) num *link* de 4800 bauds e com 3 bits adicionais por byte (tipicamente 1 *start bit*, 1 *bit* de paridade e 1 *stop bit*) exigiria um tempo de 68,75ms e outro tempo semelhante para a mensagem de retorno. Se feitas de forma cíclica e contínua, o período mínimo de troca das mensagens completas seria então de 137,5 ms e sua frequência de 7,27 Hz.

No caso do sistema desenvolvido, testes realizados com blocos de 200 mensagens de comando e de retorno indicaram um tempo de execução de 70s, o que resulta num período de 0,350 s e frequência de 2,86 Hz. Mesmo que na prática o tempo efetivo obtido tenha sido significativamente maior que o período mínimo anteriormente citado<sup>26</sup>, a velocidade da comunicação – considerando-se as velocidades típicas do VLTC – foi satisfatória para operar o sistema em tempo real.

A opção por uma mensagem de retorno padronizada também gera pelo menos uma vantagem operacional: se, dentro de um limite de tempo estabelecido a UCL deixar de receber as mensagens enviadas pela UCP, seria possível – e conveniente – manter o VLTC em *stand-by* até que a comunicação se restabelecesse e gerar um relatório ou indicação correspondente na UCP.

---

<sup>26</sup> As APIs de comunicação usadas envolvem *buffers* dos dois lados e embutem sistematicamente informações adicionais para checar a integridade das mensagens trocadas. Na ocorrência de eventuais falhas, o bloco afetado pode ser então retransmitido em tempo hábil para que não haja perda de informação e para que o processo de troca de informações se mantenha transparente aos [programas] usuários.

### 3.4 UCL, MICROCONTROLADORES, SERVOMOTORES, MOTORES DE PASSO E SINAIS E DE CONTROLE

A Unidade de Controle Local é baseada numa *plataforma Arduino*, mais especificamente no modelo *Arduino UNO* (figura 3.23), uma placa baseada no microcontrolador ATmega328 (ATMEL, 2009).

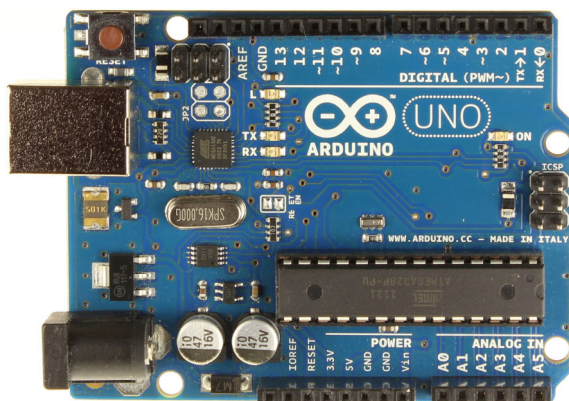


FIGURA 3.23 – VISTA DA PLACA ARDUINO UNO COM A INDICAÇÃO DE USO DOS PINOS  
FONTE: Website oficial do Projeto Arduino (2013).

Disponível em: < [http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno\\_R3\\_Front.jpg](http://arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoUno_R3_Front.jpg)>.

Consulta em 08-abr-2013.

Um microcontrolador é essencialmente um [pequeno] sistema de computador em um único chip e otimizado para controle<sup>27</sup>. Para isto ele tem de ter, no mínimo:

- Uma CPU capaz de realizar operações lógicas e aritméticas;
- Algum tipo de memória ROM capaz de armazenar o programa residente;
- Algum tipo de memória RAM capaz de armazenar as variáveis criadas durante o processamento.

<sup>27</sup> Já um microprocessador destina-se essencialmente a processar operações lógicas e aritméticas e atua em conjunto com outros componentes para realização de uma tarefa, donde a diferença entre os termos. A evolução massiva da capacidade de processamento – que pode ser descrita de forma sucinta pelo enunciado que veio a ser conhecido como Lei de Moore – tornou a expressão processador mais usual.



A capacidade de interfaceamento de um *chip* microcontrolador pode ser significativamente expandida pela inclusão de:

- Um ou mais conversores AD (analógico-digitais) – o que lhe permite medir grandezas físicas analógicas (devidamente convertidas em tensão);
- Uma ou mais portas de comunicação (geralmente serial) – o que lhe permite trocar informações com computadores ou outros dispositivos eletrônicos de uso dedicado.

O uso de técnicas de modulação PWM (*Pulse Width Modulation* / Modulação por Largura de Pulso) permite, dentro de certas limitações, gerar sinais analógicos a partir de pinos de saída digitais (tipicamente isto é feito controlando-se o ciclo de trabalho de uma onda retangular, afetando diretamente o valor médio da tensão de saída – que pode então se extraído por filtros passa-baixa RC passivos).

### 3.4.1 Sobre a escolha da plataforma Arduino

O Arduino se distingue de outros sistemas microcontrolados por ser – desde o seu início em 2006 e em todas as suas versões – uma plataforma com hardware e software *open-source* e com ampla documentação e suporte disponíveis na internet. Isto simplesmente eliminou a necessidade de investimento em compiladores e kits de desenvolvimento para modelos específicos e que, até então, eram a situação de praxe em sistemas microcontrolados oferecidos por diversos fabricantes<sup>28</sup>.

---

<sup>28</sup> Na prática, os custos e o investimento de tempo necessários para o desenvolvimento de qualquer aplicação inviabilizavam muitas das potenciais aplicações dos sistemas microcontrolados – especialmente as de pequena escala de produção e os protótipos com uma finalidade específica. A dificuldade de uso por parte de usuários de outras áreas e sem conhecimentos específicos de Automação, de Eletrônica e afins era outro obstáculo ao uso de sistemas microcontrolados. Foge ao escopo deste trabalho uma análise histórica do desenvolvimento dos microcontroladores, mas cabe o registro de que a política de plataforma *open-source* adotada pelo Arduino estabeleceu um novo paradigma na área – e que este reorientou os fabricantes de microcontroladores numa direção mais favorável a todos os potenciais usuários (inclusive os não-especializados e aficionados).

O *Arduino software* é um ambiente integrado de desenvolvimento (IDE – *Integrated Development Environment*) que inclui o editor de programas, depurador (*debugger*), compilador e um monitor serial. Um programa desenvolvido para o Arduino é usualmente denominado de *sketch* e pode ser escrito, depurado, compilado e transmitido ao *Arduino* a partir de um único ambiente e, depois disto, rodar de forma independente (*stand alone*) ou num cenário que envolva comunicação serial de dados com software rodando em um computador. Neste aspecto a plataforma é semelhante a outros sistemas microprocessados, mas a linguagem de programação do Arduino é baseada no *Wiring*, um *framework* de programação *open-source* para microcontroladores que torna o trabalho com estes dispositivos comparativamente mais fácil para um público menos especializado. Este subconjunto do C/C++ constitui uma linguagem de alto nível mais acessível à comunidade de Ciências Geodésicas e de outras áreas das Ciências Exatas que a versão completa do C/C++ ou as linguagens de baixo nível como o *Assembly*.

O *Arduino Uno* possui 14 pinos digitais de entrada/saída (dos quais 6 podem ser usados para geração de sinais PWM), 6 entradas analógicas, (associadas a conversores A/D de 10 bits) e uma porta de comunicação serial. É uma configuração suficientemente versátil para, por exemplo, controlar o VLTC desenvolvido para este trabalho (que envolve 4 servomotores, 2 motores de passo e a leitura de um acelerômetro triaxial analógico).

Caso o número de atuadores e de sensores fosse maior, uma opção seria, por exemplo, o uso de uma placa *Arduino MEGA*, onde os recursos sobem para 54 entradas/saídas digitais (com até 14 saídas PWM), 16 entradas analógicas e 4 portas de comunicação serial, o que lhe permite trocar dados com outros dispositivos providos deste tipo de comunicação. Esta característica permite, por exemplo, processamento distribuído – em sistemas de maior complexidade pode ser conveniente dispor de outros microcontroladores associados a dispositivos e tarefas subsidiárias comparativamente mais simples e específicas (que poderiam, por exemplo, ser realizadas por outros *Arduino Uno*, *Mini*, *Micro* ou *Nano*).

### 3.4.2 Sinais PWM de uso geral e sinais PWM aplicados a servomotores

A expressão PWM – *Pulse Width Modulation* / Modulação por Largura de Pulso – é bastante genérica em Eletrônica e Automação e se aplica a inúmeras situações. No contexto da plataforma Arduino, duas abordagens merecem destaque: (1) o uso genérico como "uma técnica para obtenção de resultados analógicos por meio digitais" e (2) o uso de sinais PWM padronizados no controle de servomotores de posição.

Na primeira abordagem o comando `AnalogWrite` (disponível no *Wiring*) usa uma variável inteira entre 0 e 255 para controlar o ciclo de trabalho (*duty cycle*) de uma onda retangular entre 0 e 100% e, por consequência, o valor médio da tensão de saída do pino associado a este comando (no Arduino, a frequência do sinal de saída para este comando é de aproximadamente 490Hz). A figura 3.24 ilustra esta técnica, onde a linha tracejada indica o valor médio da tensão resultante.

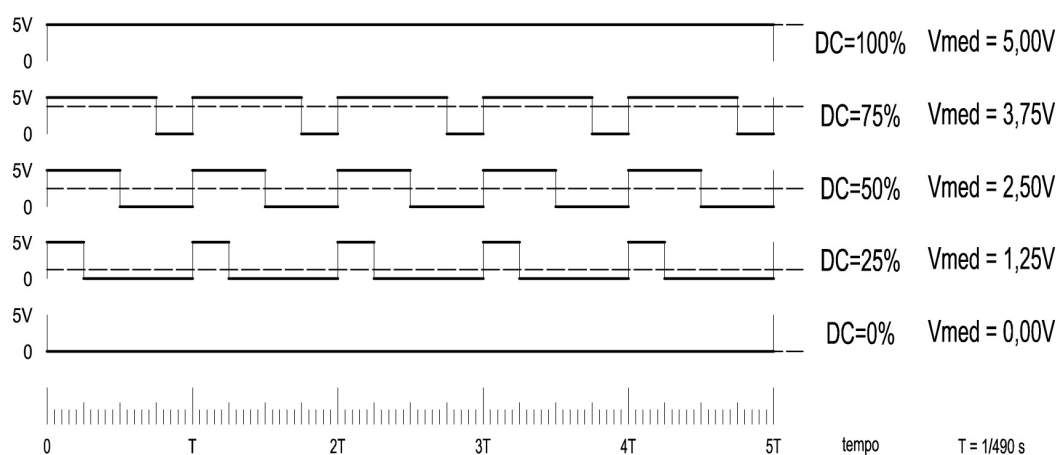


FIGURA 3.24 – RELAÇÃO ENTRE O CICLO DE TRABALHO (*DUTY CYCLES* – DC) E A TENSÃO MÉDIA DE SAÍDA ( $V_{med}$ )  
 FONTE: Autor (2013)

A corrente máxima de saída de um pino proporcionada pelo Arduino é tipicamente de 40mA, o que é suficiente para o acionamento direto de dispositivos como leds (onde o ciclo de trabalho controlaria o brilho aparente). Com motores DC (onde o ciclo de trabalho, por controlar a tensão média, controlaria a velocidade) o

acionamento poderia ser feito, por exemplo, com o auxílio de transistores ou dispositivos como uma ponte H. Pequenos motores DC de tensão nominal 5V poderiam até mesmo compartilhar a mesma fonte de alimentação do Arduino.

Com a intermediação de acopladores ópticos, pontes H, transistores de potência, tiristores e outros dispositivos eletrônicos tipicamente empregados no que se chama genericamente de *controle de potência* ou de *eletrônica de potência*, o Arduino e outros sistemas microcontroladores podem comandar uma ampla diversidade de atuadores como motores DC, motores de passo, motores trifásicos, servomotores, transformadores, lâmpadas etc. Além disto, é oportuno observar que quase todas as aplicações de potência necessitam de tensões de alimentação diferentes daquela do Arduino (+5V na maioria dos modelos) e que, em geral, o uso de acopladores ópticos é uma opção recomendável para tornar estes sistemas – microcontrolador e etapas de potência – eletricamente independentes<sup>29</sup>.

A segunda abordagem interessa diretamente a este trabalho porque a incorporação da biblioteca de funções para servos (*servo library*) ao *sketch* permite controlar diretamente os servomotores de posição empregados no sistema de controle direção usando a padronização PWM adotada pelos fabricantes de servos.

Tipicamente o valor da frequência dos sinais PWM empregados no controle de servomotores é de 50Hz (período de 20ms), mas pode variar significativamente em torno deste valor porque, no caso específico dos servomotores, *a variável que efetivamente controla o servo é apenas a largura do pulso em nível lógico alto* e o comportamento decorrente segue regras bastante estritas<sup>30</sup>.

---

<sup>29</sup> Diversos motivos contribuem para tornar as etapas de potência "ambientes eletricamente agressivos": os níveis comparativamente altos das tensões e correntes nas etapas de potência facilitam a indução de ruídos em outros sistemas eletrônicos; o centelhamento que acontece durante o chaveamento de cargas indutivas (caso de praticamente todos os tipos de motores elétricos); redução transitória do valor da tensão de alimentação por correntes de surto (típicas de condições de partidas e retomadas); etc.

<sup>30</sup> Um período de 20ms permite transmitir vários sinais PWM independentes num processo chamado genericamente de multiplexação por divisão de tempo. Com isto, é possível controlar diversos servomotores com um único meio de transmissão, mas para recuperar os sinais na ordem correta, o

A relação típica entre os sinais PWM aplicados a um servomotor e as correspondentes posições por ele ocupadas encontra-se ilustrada nas figuras 3.25 e 3.26.

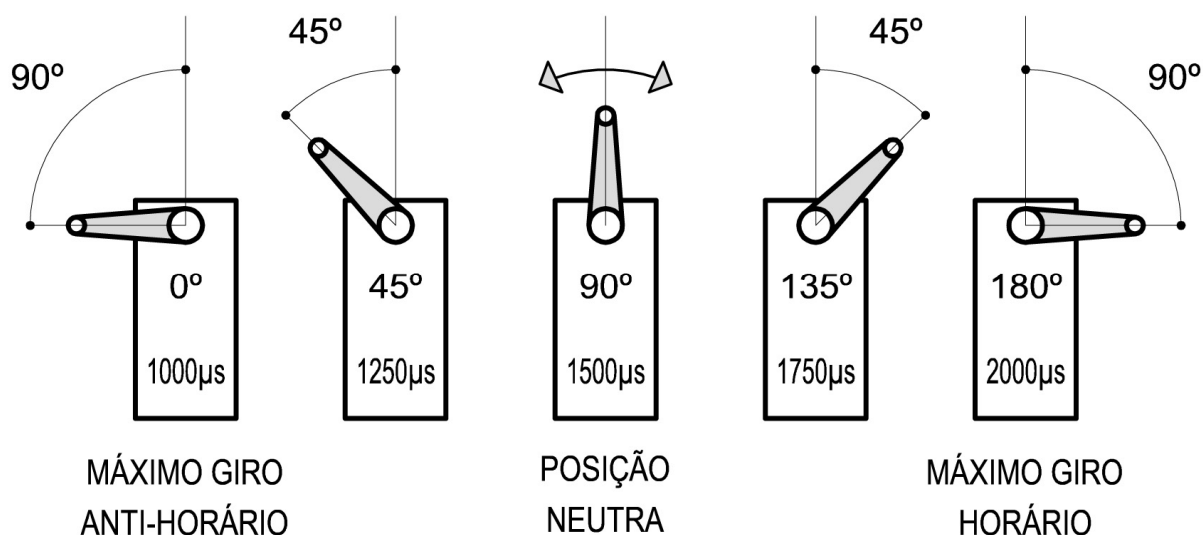


FIGURA 3.25 – RELAÇÃO TÍPICA ENTRE A POSIÇÃO DO SERVOMOTOR, EXPRESSA EM GRAUS E A LARGURA DE PULSO EM MICROSSEGUNDOS  
 FONTE: Autor (2013)

Nos servos *standard* o padrão é de 1500µs para a posição central (90°), 1000µs (0°) para a posição de máximo giro no sentido anti-horário e 2000µs (180°) no sentido horário (figura 3.25). Dependendo do modelo, os valores associados às posições extremas podem variar um pouco além ou aquém, mas a especificação 1500µs e 90° para a posição central do servo permanece<sup>31</sup>.

sistema precisa necessariamente ser capaz de distinguir o primeiro sinal de cada bloco – em outras palavras, há necessidade de garantir o sincronismo dos sinais. Processos assim são amplamente utilizados por fabricantes de sistemas de rádio-controle (RC – *Radio Control*) usados por aero, auto e nautimodelistas – que, tipicamente, precisam controlar vários servos simultaneamente .

<sup>31</sup> Existem servomotores onde esta relação é invertida. Tipicamente eles se destinam a aplicações onde são necessários movimentos síncronos e complementares a partir de um único sinal de controle PWM. A relação 1500µs → posição central de 90° é a mesma para os dois servomotores, mas quando o servo *standard* gira para a direita ou outro gira para a esquerda e vice-versa.

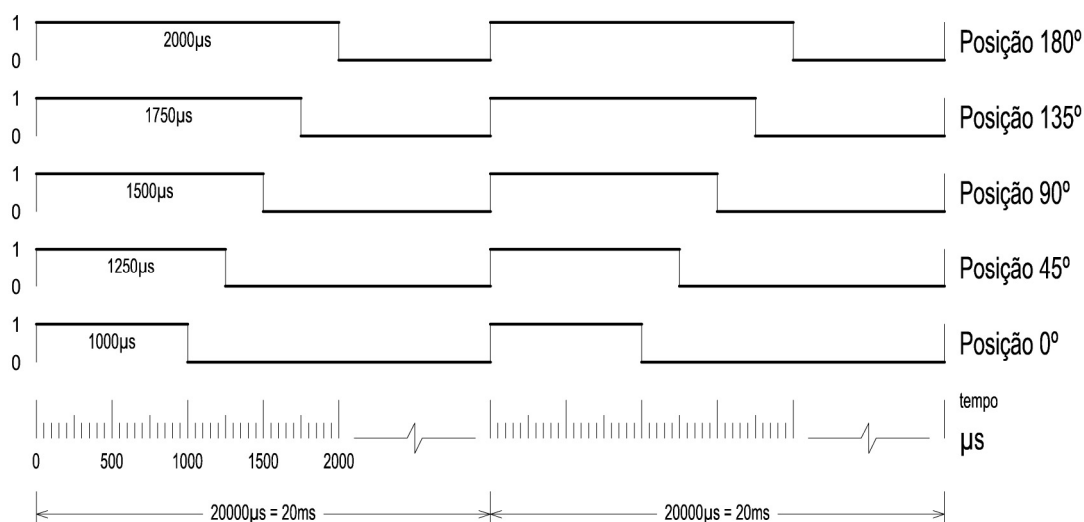


FIGURA 3.26 – ASPECTO DO SINAL PWM  
DE CONTROLE DO SERVOMOTOR PARA AS POSIÇÕES INDICADAS  
FONTE: Autor (2013)

A *servo library* do Arduino permite comandar as posições de um servomotor tanto por meio de do ângulo da posição desejada quanto por meio da correspondente largura de pulso em microssegundos:

```
servo.write(angle)
servo.writeMicroseconds(us)
```

Por exemplo, o *sketch* seguinte foi usado para posicionar o servomotor de cada conjunto de direção (DF, DR, EF, ER) em testes iniciais realizados na plataforma estática mostrada na seção 3.4.5. Posteriormente um código semelhante, mas com menor amplitude no movimento dos servos, foi usado para testar a relação entre o ângulo de giro do servomotor de direção e o correspondente ângulo de giro da roda para estudo da correção de não-linearidade nos controles de direção (ver seção 3.2.16). Os comentários, formatação e estrutura do código-fonte embutem o resumo das devidas explicações. O monitor serial do Arduino IDE foi usado para visualizar o resultado na tela e a maior parte do código corresponde a esta tarefa.

#### EXTRATO

```
// inclui a biblioteca Servo.h no sketch
#include <Servo.h>
// cria a variável servoDF
Servo servoDF;
```

```

// Hextronik HXT900 - 9g Micro Servo
// Pulse Cycle 20ms
// Pulse Width 450-2450us
// http://www.servodatabase.com/servo/hextronik/hxt900

// Definir a LARGURA DE PULSO MINIMA E MAXIMA do sinal PWM
// Isto varia conforme o modelo do servomotor
// consultar datasheet do do fabricante
// Hextronik HXT900 - 9g Micro Servo
// Pulse Cycle 20ms
// Pulse Width 450-2450us
int PWmin = 450;
int PWmax = 2450;

void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
  // associa o servoDF ao pino 10
  servoDF.attach(10);
}

void loop() {
  int PWcentro = 1500;
  // largura de pulso na posicao central
  servoDF.writeMicroseconds(PWcentro);
  // posiciona o servomotor na posicao central
  Serial.println(' ');
  Serial.print(PWcentro);
  Serial.print(" us => POSICAO CENTRAL");
  Serial.println(' ');
  delay(3000);
  // fica parado 3000 milissegundos = 3 segundos

  // teste de movimento gradual - inicio
  for (int PW=PWmin; PW<=PWmax; PW=PW+10){
    // indicacao de largura de pulso minima e maxima
    if (PW==PWmin) {
      servoDF.writeMicroseconds(PWmin);
      Serial.println(' ');
      Serial.print(PWmin);
      Serial.print(' ');
      Serial.println(" us => LARGURA DE PULSO MINIMA");
      Serial.println(' ');
      delay(3000);
    }
    servoDF.writeMicroseconds(PW);
    Serial.println(PW);
    delay(50);
    if (PW==PWmax) {
      Serial.println(' ');
      Serial.print(PWmax);
      Serial.print(" us => LARGURA DE PULSO MAXIMA");
      Serial.println(' ');
      delay(3000);
    }
  }
  // teste de movimento gradual - fim
}

```

### 3.4.3 Sobre os motores de passo e *drivers* neste trabalho

Na seção 3.3.1, citou-se que "do ponto de vista de cada um dos respectivos *drivers* [dos motores de passo] a realização prática das funções [de tração] requer (a) a geração de um sinal binário e (b) de um trem de pulsos (o valor do sinal define o sentido de giro do motor e a quantidade de pulsos define o ângulo de giro)" [e a correspondente distância percorrida pelo VLTC].

Os motores de passo e os *drivers* selecionados para este trabalho foram escolhidos entre soluções reconhecidamente eficientes em sistemas de automação industrial. Os motores são do modelo AK57H/3G5-1.8 (NEOYAMA, 2012a) com *drivers* modelo AKDMP16-4.2A (NEOYAMA, 2012b).

Como as características dos motores são suficientes para a movimentação do VLTC nos ambientes usados para teste do sistema, um *driver* compatível, devidamente alimentado, gerencia completamente o comportamento do motor a partir dos sinais de controle. No caso do VLTC, a alimentação dos *drivers* foi feita com tensão nominal de 24V<sub>DC</sub>, proporcionada por duas baterias seladas de 12V 7Ah.

No que diz respeito aos sinais de controle, a tensão de alimentação do Arduino é de 5V, a configuração dos sinais é NPN (um pulso lógico 0→1→0 corresponde a uma seqüência de tensões GND→VCC→GND) e a capacidade de fornecimento de corrente nos pinos de saída do Arduino é de aproximadamente 40 mA. Isto é diretamente compatível com os optoacopladores internos dos *drivers* utilizados e dispensa a intermediação de outros componentes eletrônicos. A figura 3.27 detalha as conexões de comando da tração direita e esquerda indicadas genericamente na figura 3.2.



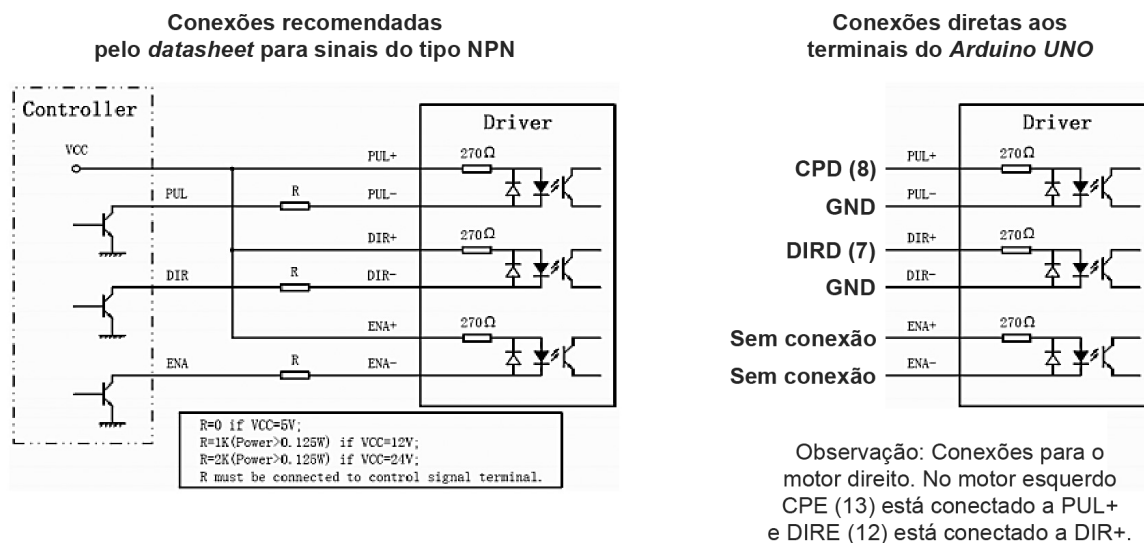


FIGURA 3.27 – CONEXÕES DOS OPTOACOPLADORES DOS  
DRIVERS DE COMANDO DOS MOTORES DE PASSO  
FONTE: Modificado pelo autor (2013)

Os extratos de código-fonte a seguir ilustram como, na UCL, o Arduino gera os sinais de durante e execução da função FRENTE. Cabe comentar que:

- A função FRENTE é precedida pela função LR, DLD ou DLE;
- Na UCP o parâmetro original é a distância a ser percorrida em linha reta, mas na mensagem UCP-UCL esta informação já está convertida no número de pulsos necessário à sua execução;
- Pela disposição de montagem dos motores de passo na plataforma do VLTC, todas funções, exceto as de giro, precisam de valores binários complementares nas variáveis que controlam o sentido de giro de cada motor.

#### EXTRATO 1

```
// pinos associados aos motores de passo
unsigned int DIRpinD = 7; // MP Direito - sentido de giro
unsigned int CPpinD = 8; // MP Direito - pulsos de controle
unsigned int DIRpinE = 12; // MP Esquerdo - sentido de giro
unsigned int CPpinE = 13; // MP Esquerdo - pulsos de controle

unsigned int THTL = 1000; // Largura dos pulsos TH e TL em microssegundos (us)
                          // para uso na funcao delayMicroseconds dentro das
                          // funcoes de comando dos motores de passo.
                          // Nao deve ser menor que 10 por necessidades dos
                          // drivers dos motores de passo (TH de CPmin>5us).
```

## EXTRATO 2

```
// FUNCAO FRENTE - inicio

void FRENTE(unsigned int numero_de_pulsos) {

    digitalWrite(DIRpinD, HIGH); // gira em sentido horario
    digitalWrite(DIRpinE, LOW); // gira em sentido anti-horario
    digitalWrite(CPPinD, LOW);
    digitalWrite(CPPinE, LOW);

    for (unsigned int i=1; i<=numero_de_pulsos; i++) {
        digitalWrite(CPPinD, HIGH);
        digitalWrite(CPPinE, HIGH);
        delayMicroseconds(THTL); // intervalo de THTL us em nivel 1
        digitalWrite(CPPinD, LOW);
        digitalWrite(CPPinE, LOW);
        delayMicroseconds(THTL); // intervalo de THTL us em nivel 0
    }

}

// FUNCAO FRENTE - fim
```

### 3.4.4 Sincronização dos motores de passo no modo curva

Nas funções de movimento em curva as rodas internas percorrem uma distância menor que as externas e o número de pulsos é proporcionalmente menor ( $NP_{int} < NP_{ext}$ ). A relação  $KREF = NP_{int} / NP_{ext}$  é um número racional entre 0 e 1 que quantifica esta proporção.

A estratégia adotada foi a criação de um *loop* com duas variáveis contadoras,  $np_{INT}$  e  $np_{EXT}$ , que contabilizam os pulsos enviados aos *drivers* do motores de passo e que, ao final do *loop*, se igualam a  $NP_{int}$  e  $NP_{ext}$ , respectivamente.

Como  $NP_{ext}$  é maior, ela é usada para indicar o número de repetições do *loop*. Um variável auxiliar  $kref = np_{INT}/np_{EXT}$  é usada na tomada de decisão do *loop*: se  $kref > KREF$ , apenas  $np_{EXT}$  será incrementado (o que diminui o novo valor de  $kref$ ); caso contrário, tanto  $np_{EXT}$  quanto  $np_{INT}$  serão incrementados (o que aumenta o novo valor de  $kref$ ).

Na página seguinte encontra-se a transcrição do código-fonte de uma das funções de movimento em curva.

```

// FUNCAO CURVADireita - inicio
// E chamada pela funcoes CFD, CDR

void CURVADireita (unsigned int NPext, unsigned int NPint) {

    // motor D (INTERNO) gira MENOS
    // motor E (EXTERNO) gira MAIS

    digitalWrite(CPpinD, LOW);
    digitalWrite(CPpinE, LOW);

    unsigned int npEXT = 0;
    unsigned int npINT = 0;

    float K1=NPint;
    float K2=NPext;
    float KREF = K1/K2;
    float k1=npINT;
    float k2=npEXT;
    float kref = 0;

    for (unsigned int i=1; i<=NPext; i++) {

        if (kref > KREF)
        {
            // gira somente E (EXTERNO)
            digitalWrite(CPpinE, HIGH);
            delayMicroseconds(THTL);
            digitalWrite(CPpinE, LOW);
            delayMicroseconds(THTL);
            npEXT = npEXT+1;
        }
        else
        {
            // gira D (INTERNO) e E (EXTERNO)
            digitalWrite(CPpinD, HIGH);
            digitalWrite(CPpinE, HIGH);
            delayMicroseconds(THTL);
            digitalWrite(CPpinD, LOW);
            digitalWrite(CPpinE, LOW);
            delayMicroseconds(THTL);
            npEXT = npEXT+1;
            npINT = npINT+1;
        }
        k1=npINT;
        k2=npEXT;
        kref = k1/k2;
    }

}

// FUNCAO CURVADireita - fim

```

Para a implementação bem sucedida deste algoritmo foi necessário o emprego de variáveis tipo *float* (ponto flutuante) em kref e KREF e também a criação

das variáveis *float* intermediárias  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  para copiar os valores de  $npINT$ ,  $npEXT$ ,  $NPint$ ,  $NPext$ , que são originalmente do tipo *unsigned int* (inteiras positivas).

A FIGURA 3.28 ilustra graficamente este processo de sincronismo com números bastante reduzidos – 40 pulsos externos e 30 internos.

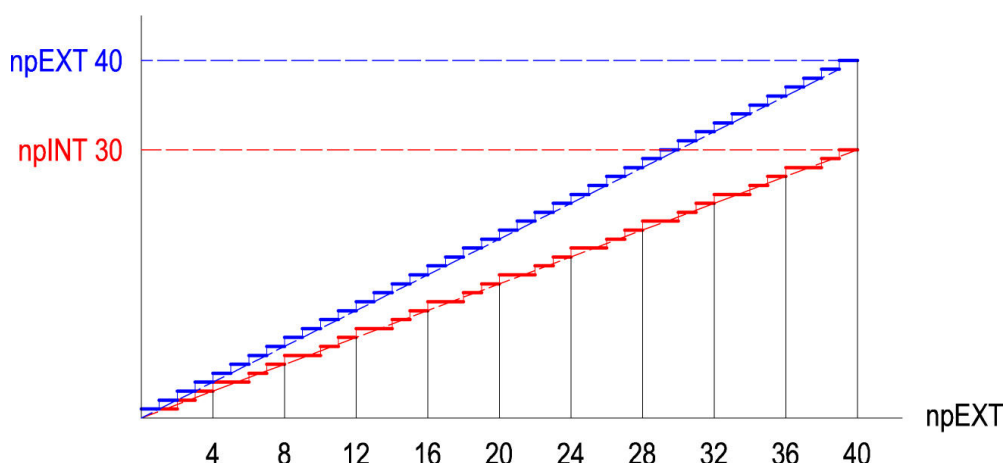


FIGURA 3.28 – SINCRONIZAÇÃO DOS PULSO DOS MOTORES DE PASSO  
NAS FUNÇÕES DE MOVIMENTO EM CURVA  
FONTE: Autor (2013)

Na prática, o conjunto driver/motor de passo usado no VLTC precisa de 400 pulsos para uma volta. Como sua caixa de redução é de 5 vezes, são 2000 pulsos para um único giro completo da roda. Este quantitativo é suficiente para que a plasticidade de componentes do sistema (notadamente os pneus) e as folgas mecânicas da plataforma desenvolvida absorvam as variações embutidas no processo de sincronismo.

#### 3.4.5 Plataforma estática e testes durante o desenvolvimento das funções do VLTC

O desenvolvimento e implementação do controle das funções do VLTC na UCL através do *Arduino* aconteceu paralelamente ao desenvolvimento do veículo e vários tipos de teste foram então realizados antes que o mesmo estivesse pronto.

Como auxílio ao processo de desenvolvimento dos programas de controle do VLTC foi montada a plataforma estática mostrada na figura 3.29, que operava com

exatamente os mesmos sinais usados pelo VLTC (então em desenvolvimento) e a mesma disposição relativa dos servomotores e motores de passo,

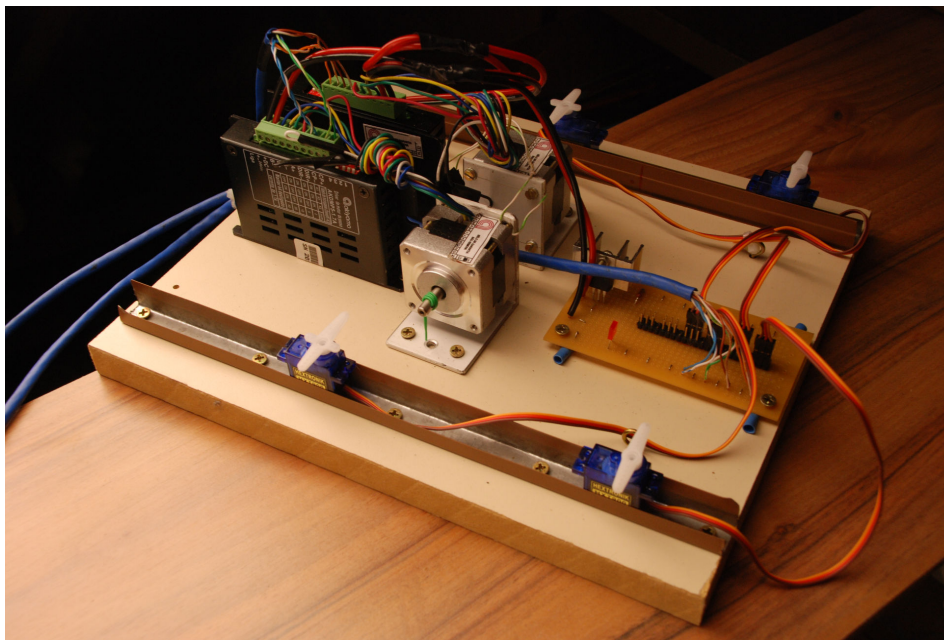


FIGURA – 3.29 PLATAFORMA ESTÁTICA USADA EM TESTES DAS FUNÇÕES DO VLTC  
FONTE: Autor (2013)

Na plataforma estática foram usados 4 microservalos HEXTRONIK HXT900 (SERVODATABASE, 2013), dois motores de passo AK39H/12-1.8 (NEOYAMA, 2012c) e dois *drivers* AKDMP5-1.7A (NEOYAMA, 2012d). A tensão de alimentação dos microservalos foi obtida por um regulador de tensão LM7805 (saída +5V) a partir da bateria de 12V usada para alimentação dos *drivers*.

A principal facilidade proporcionada pela plataforma estática de testes foi a capacidade de visualizar os resultados de todas as funções (do VLTC) programadas no *Arduino* – e posteriormente no Matlab – de uma forma bastante prática. O sentido de giro dos servomotores em cada função podia ser diretamente visualizado e, se necessário, corrigido nos *M-files* e *sketches* correspondentes. O acoplamento de hastes transversais aos eixos dos motores de passo direito e esquerdo também permitia conferir os respectivos sentidos de giro. A princípio também era possível visualizar o ângulo de giro do motor para valores notáveis (por exemplo, 1/4 de volta, 1/2 volta ou um número inteiro de voltas), mas este tipo de teste não era adequado para detectar eventuais falhas de pequena magnitude no número de pulsos de

controle de cada motor. Para este tipo de teste foi necessária uma abordagem distinta e de maior exatidão.

Nas funções de movimento em linha reta o número de passos efetivamente gerados pela função em MD e ME foi conferido através de comandos estrategicamente posicionados no *sketch* para escrever no monitor serial o valor da variável contadora dos pulsos durante a execução dos *loops*.

Uma abordagem semelhante, mas com variáveis contadoras distintas para o motores de passo direito e esquerdo, foi usada nos testes iniciais das primeiras versões das funções de movimento em curva. Durante estes testes foram detectados *bugs* como a inesperada perda de alguns pulsos e mesmo a geração de pulsos adicionais. A solução deste problema (comentada na seção anterior) demandou além da investigação de prováveis causas, diversas experiências<sup>32</sup> com tipos de variáveis. O recurso de escrever o valor das variáveis contadoras no monitor serial do Arduino revelou-se essencial tanto para detecção do problema quanto para seu estudo e o desenvolvimento da solução (descrita na seção anterior).

#### 3.4.6 Sobre capacidade de processamento e divisão de tarefas entre a UCP e a UCL

No que diz respeito aos diversos tipos de cálculos envolvidos no sistema como um todo, vale comentar que o cálculo de funções transcendentais e outras operações matemáticas de alto nível constitui a condição típica de ambientes como o Matlab (caso da UCP). Por outro lado, no hardware e no software empregados na UCL do VLTC (um sistema baseado em um microcontrolador) a condição típica dos cálculos envolve principalmente o uso de variáveis lógicas, bytes e números inteiros positivos (usados, no caso, para variáveis como número de passos de um motor ou a largura em microssegundos de um sinal PWM aplicado a um servomotor).

---

<sup>32</sup> A princípio – de acordo com a documentação do *Arduino Software* – calcular *kref (float)* a partir de *npINT/npEXT (unsigned int)* ou de *k1/k2 (float)* daria o mesmo resultado (tipo *float*). Mas, na prática, isto simplesmente não aconteceu e o problema somente foi solucionado com a criação das variáveis *k1, k2, K1, K2*, (tipo *float*) para copiar os valores de *npINT, npEXT, NPint, NPext* (tipo *unsigned int*).

O subconjunto do C/C++ usado nas plataformas *Arduino* permite o uso de funções transcendentais e de operações matemáticas com ponto flutuante, mas é imprescindível ter em mente que:

- A frequência de *clock* do *Arduino Uno* (16MHz) é notoriamente inferior à do processador de um computador típico (3,3GHz, por exemplo);
- A comparação da ordem de grandeza das memórias é igualmente notável. A capacidade de memória do ATmega 328 (o microcontrolador do *Arduino Uno*) é de 32kbytes Flash / 2kbytes SRAM / 2kbytes EEPROM. Um computador típico conta com 2 a 4 gigabytes de RAM e com 500GB a 1TB de disco rígido.

Estas comparações – entre equipamentos de capacidades e propósitos essencialmente distintos – reforçam a justificativa da estratégia adotada de, tanto quanto possível, usar a UCP para processar e armazenar a maioria das informações e delegar à UCL apenas tarefas típicas de sistemas microcontrolados. Por estes motivos, convém que até mesmo a correção de não-linearidade da relação  $\theta_{RODA}$  e  $\theta_{SERVO}$  e o cálculo da inclinação da plataforma sejam realizados no Matlab. Nas tarefas do *Arduino Uno*, as únicas variáveis do tipo *float* usadas no *sketch* foram aquelas estritamente necessárias ao sincronismo dos motores de passo nas funções de movimento em curva.

### 3.5 SISTEMA SENSOR DE INCLINAÇÃO

#### 3.5.1 Acelerômetro triaxial MMA7361L

O sistema sensor de inclinação do VLTC é baseado no acelerômetro triaxial MMA7361L (figuras 3.30 e 3.31), um circuito integrado (CI) de aplicação específica (ASIC – *Application-Specific Integrated Circuit*).

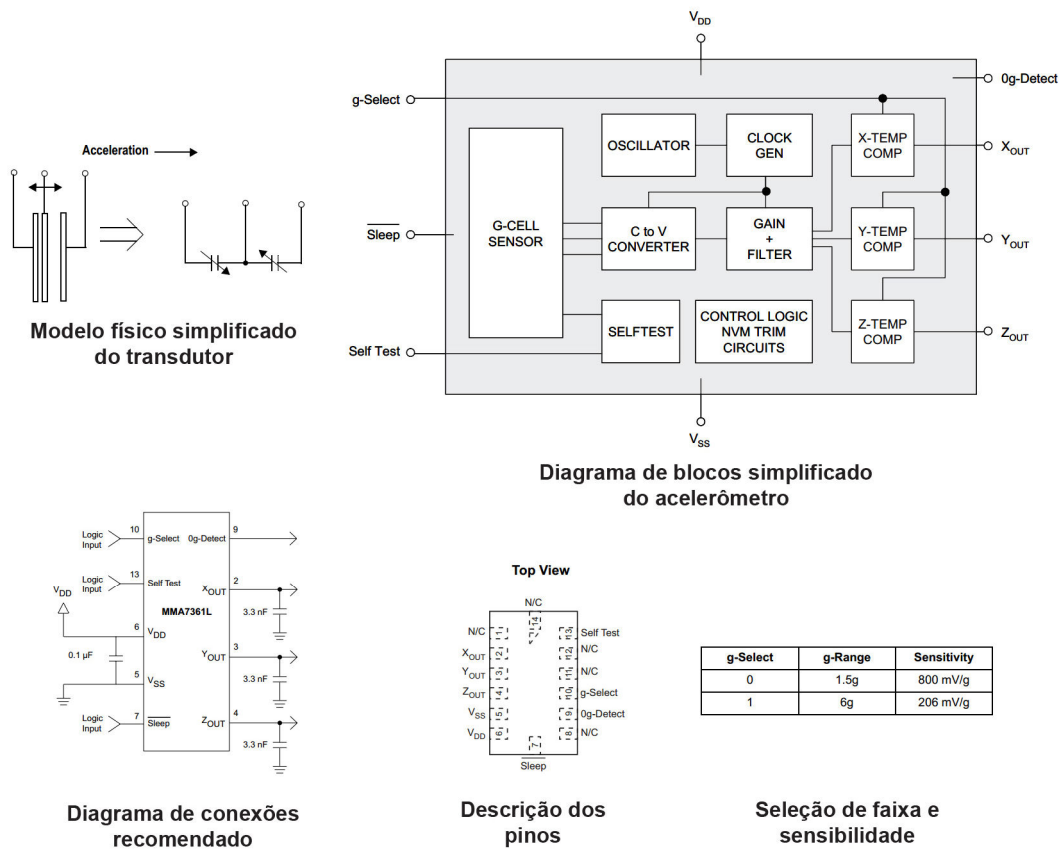


FIGURA – 3.30 VISÃO GERAL DA CONSTITUIÇÃO INTERNA DO ACELERÔMETRO TRIAXIAL MMA7361L  
FONTE: FREESCALE (2013)  
NOTA: Tradução nossa.

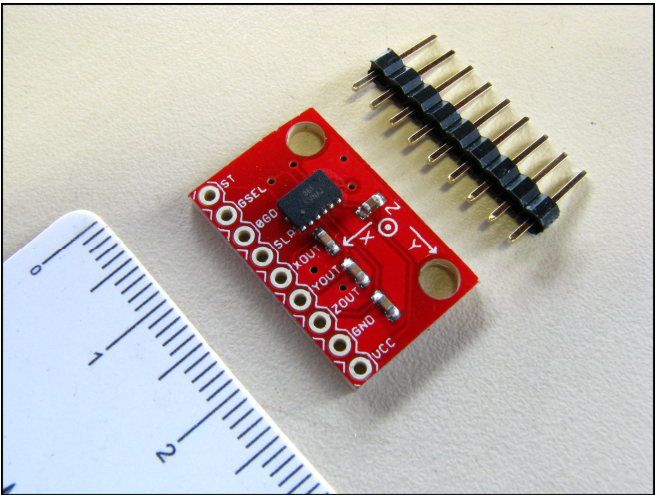


FIGURA 3.31 – ACELERÔMETRO TRIAXIAL MMA7361L MONTADO EM PLACA  
Fonte: Autor (2013)



Este dispositivo MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) emprega uma célula com sensores capacitivos duplos cuja diferença entre os valores de capacitância é proporcional à aceleração no correspondente eixo (figura 3.30, no topo, à esquerda). A diferença de capacitância em cada eixo da célula é tratada internamente por um circuito conversor capacitância-tensão, amplificada e filtrada (filtro passa-baixa RC de primeira ordem) de modo a gerar um sinal de tensão contínua que varia linearmente em função da aceleração.

O CI MMA7361L pode ser configurado para uma faixa de operação de  $\pm 1,5$  g ou de  $\pm 6$  g (onde g expressa a aceleração da gravidade em condições normais, cerca de  $9,81 \text{ m/s}^2$ ) com sensibilidade de 800mV/g e de 206mV/g, respectivamente. No caso, foi selecionada a faixa de 1,5 g, que é mais adequada ao ambiente de operação do VLTC porque (a) esta faixa é mais sensível que a outra opção e (b) porque as acelerações são usadas apenas para monitorar a inclinação do VLTC durante as medições de posição feitas pela ETR. A faixa de operação e a sensibilidade são iguais para os sensores dos eixos X, Y, Z (que, no momento, se referem ao sistema de coordenadas do encapsulamento e não ao sistema de coordenadas local usado nos levantamentos).

### 3.5.2 Proporcionalidade métrica (*ratiometricity*)

Uma característica importante do acelerômetro usado é sua proporcionalidade métrica (em inglês, *ratiometricity*). Isto significa que a tensão *offset* de saída e a sensibilidade são diretamente proporcionais à tensão de alimentação do CI. Esta é uma característica-chave no interfaceamento com microcontroladores onde, em geral, as tensões de referência para os conversores analógico-digitais internos podem ser selecionadas entre a tensão de alimentação ou uma tensão externa de referência (FREESCALE, 2008). No caso da UCL a tensão de referência para conversão AD (terminal AREF do *Arduino UNO*) é a própria tensão de 3,3V disponível no *Arduino* e usada para alimentação do acelerômetro.

### 3.5.3 Comportamento estático e dinâmico do acelerômetro

A figura 3.32 mostra a relação entre o sistema de coordenadas do acelerômetro e o seu encapsulamento (quadro *Aceleração dinâmica*) e também o comportamento estático do acelerômetro quando os eixos X, Y, Z (do encapsulamento) são posicionados paralelamente à direção do vetor **g** (quadro *Aceleração estática*). As tensões de saída indicadas correspondem a uma tensão de alimentação nominal de 3,3V.

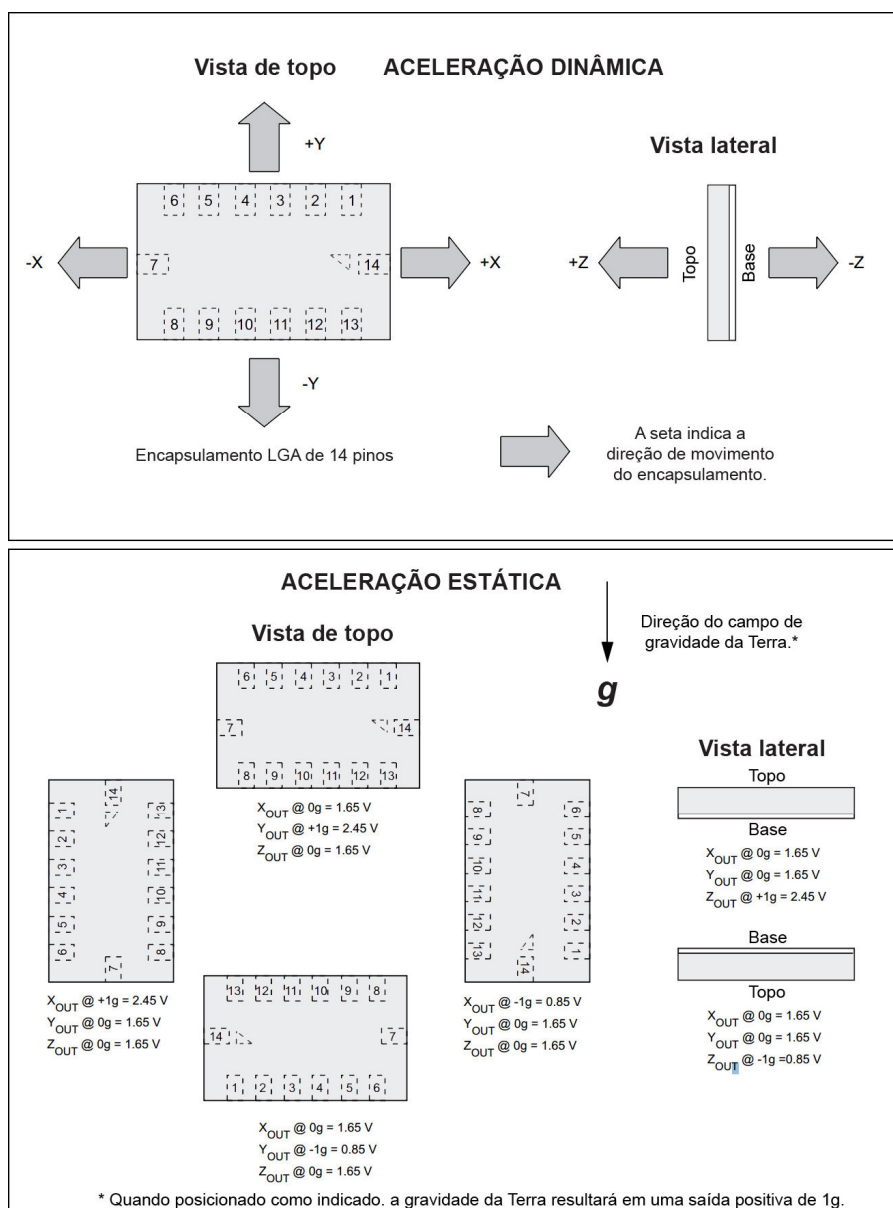


FIGURA 3.32 – COMPORTAMENTO DINÂMICO E ESTÁTICO DO ACELERÔMETRO MMA7361L  
 FONTE: FREESCALE (2013)  
 NOTA: Tradução nossa.

A conversão AD destas tensões no *Arduino Uno* (equipado internamente com conversores AD de 10 bits) transforma as tensões  $X_{OUT}$ ,  $Y_{OUT}$  e  $Z_{OUT}$  (valores no intervalo entre 0V e 3,3V)<sup>33</sup> em valores numéricos inteiros entre 0 e 1023 (respectivamente  $0000000000_2$  e  $1111111111_2$ ). As leituras correspondentes aos eixos X, Y e Z do acelerômetro são sistematicamente inseridas na mensagem de retorno da UCL para a UCP onde, no ambiente Matlab, são processadas para gerar as correspondentes inclinações do VLTC.

### 3.5.4 Vínculo entre os sistemas de coordenadas do acelerômetro e do VLTC

A relação entre o sistema de coordenadas da placa do acelerômetro e o VLTC está ilustrada na figura 3.33.

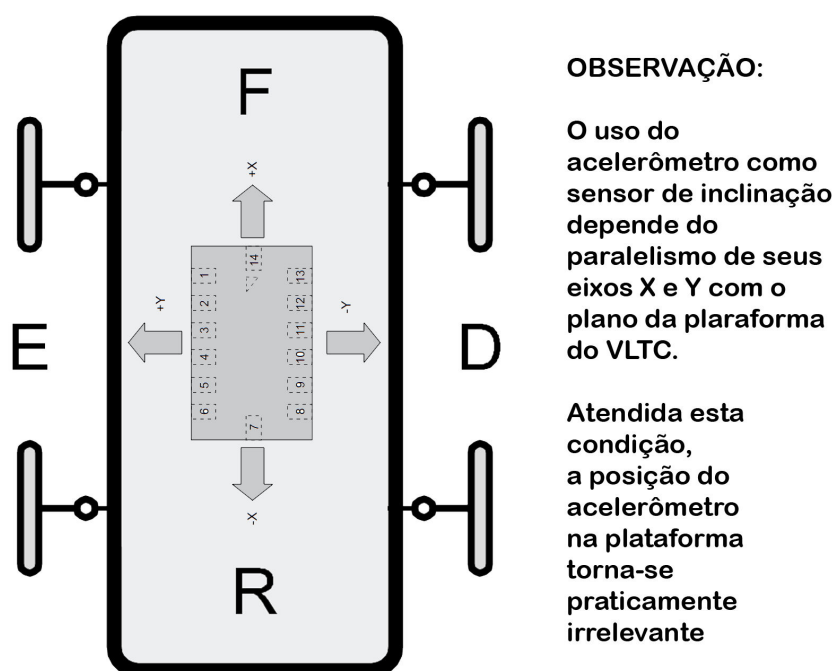


FIGURA 3.33 – VÍNCULO ENTRE O SISTEMA DE COORDENADAS DO ACELERÔMETRO E O SISTEMA DE COORDENADAS DO VLTC  
FONTE: Autor (2013)

<sup>33</sup> A tensão de alimentação do Arduino é de 5V e a do acelerômetro MMA7361L é de 3,3V. O Arduino possui uma saída de 3,3V com capacidade de corrente suficiente para alimentar dispositivos de baixa potência e que, no caso deste trabalho, foi usada na alimentação do acelerômetro MMA7361L e na conexão ao terminal AREF (Analog REFerence) do Arduino (ver seção 3.5.2 Proporcionalidade Métrica).

O eixo Y do acelerômetro está orientado para a frente do veículo, o eixo X para a direita e o eixo Z para cima. Isto posto, em condições normais, a componente X do acelerômetro está diretamente relacionada com a inclinação do eixo lateral do VLTC (Rolamento/*Roll*) e a componente Y com a inclinação do eixo longitudinal (Arfagem/*Pitch*).

As informações do acelerômetro podem ser usadas para a redução das coordenadas do prisma e para a detecção de necessidade de amostragens adicionais devido à variação do relevo amostrado pelo veículo.

### 3.6 VIABILIDADE DO USO DA ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA LEICA TCRA 1205 R100 EM LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS CINEMÁTICOS

O experimento descrito sucintamente nesta seção foi realizado com o propósito de testar a viabilidade de emprego da ETR Leica TCRA 1205 R100 em *levantamentos topográficos cinemáticos* e como *sistema de posicionamento* para o VLTC então ainda em estudos preliminares. O desenvolvimento da experiência encontra-se detalhado no apêndice A, mas cabe aqui comentar que seus resultados indicaram a viabilidade do uso da ETR no posicionamento do VLTC.

O experimento usou como referência um método de reconhecida eficiência: o método cinemático com receptores GNSS RTK L1/L2 GPS & GLONASS e foi realizado em área de testes com geometria bem definida e favorável a este método. O alvo móvel empregado foi transportado em velocidades de caminhada (cerca de 5km/h), que era a ordem de grandeza esperada para a então futura operação do VLTC.

As figuras 3.34 e 3.35 ilustram parte do equipamento usado na experiência e a respectiva área de testes.



FIGURA 3.34 – HASTE COM O PRISMA 360° E A ESTAÇÃO MÓVEL RTK  
FOTOS: WANDER DA CRUZ (2011)



FIGURA 3.35 – VISÃO GERAL DO CENTRO POLITÉCNICO  
DA UFPR E DA PISTA DE ATLETISMO USADA COMO ÁREA DE TESTES DE  
VIABILIDADE DE USO DA ETR TCRA 1205 COMO SISTEMA DE POSICIONAMENTO DO VLTC  
FONTE: Esteio Engenharia E Aerolevantamentos (2008) e Google Earth (2009)

### 3.7 CONTROLE DOS LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMOS

Para realizar o levantamento de forma semi-autônoma, o VLTC se movimenta no interior da área especificada para obter as coordenadas de uma malha de pontos que – no aspecto planimétrico – seja tão regulamente espaçada quanto possível. Ao mesmo tempo o sistema procurar analisar o comportamento do VLTC para coletar pontos onde a variação do relevo justifique amostras adicionais.

A combinação destes dois procedimentos de coleta deve resultar no conjunto de pontos que será usado para gerar um modelo digital de superfície representativo do relevo da área.

### 3.7.1 Definições dos limites

Os limites externos da área a ser levantada são definidos por um único polígono simples com coordenadas expressas no Sistema de Coordenadas Local (SCL). Este polígono, por ser obrigatoriamente simples, pode ser côncavo ou convexo, mas exclui quaisquer possibilidades de entrelaçamento. Doravante este polígono descritor dos limites externos será chamado de *Polígono Principal* (PP). A figura 3.36 ilustra um polígono principal definido por um octógono irregular.

De modo semelhante, qualquer área a ser excluída do levantamento, se for o caso, também é definida por um polígono simples e, doravante, denominado de *Polígono de Exclusão* (PE), que deve necessariamente estar no interior do polígono principal. Além disto, no caso de haver mais de um polígono de exclusão, todos os PEs deverão obrigatoriamente representar áreas distintas, sem quaisquer intersecções de área ou pontos de contato<sup>34</sup>. Esta condição torna o problema tratável, favorece a visualização do processo e reduz a complexidade dos algoritmos envolvidos no controle do levantamento.

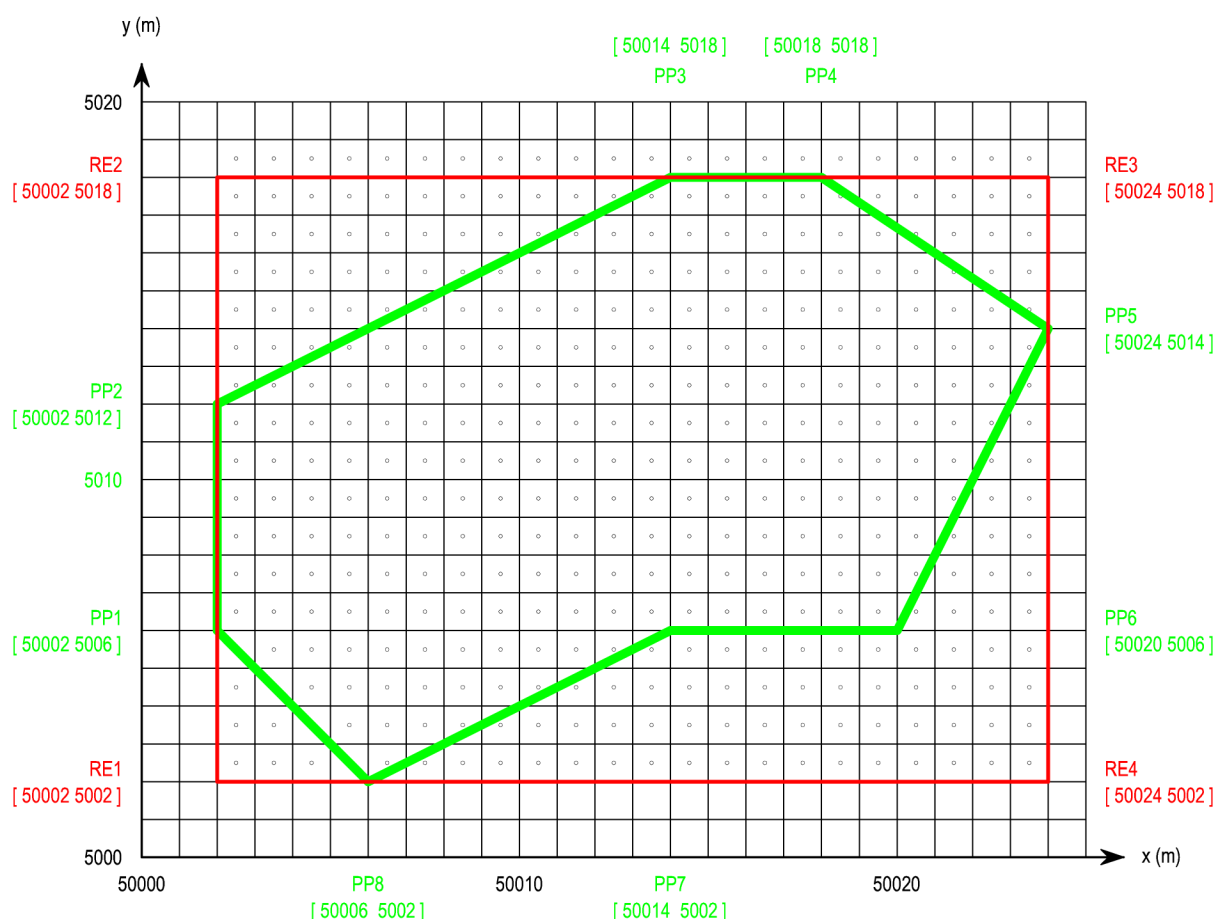
### 3.7.2 Polígono principal e retângulo envolvente

Os  $n$  vértices do polígono principal são descritos por uma única matriz de  $n$  linhas e 2 colunas.

---

<sup>34</sup> Embora seja, em teoria, mais restritiva que a descrição geral proposta para polígonos vazados apresentada na revisão bibliográfica (que admitia situações como um eventual contato de dois vértices de dois PEs ou o eventual contato de um vértice de um PE com um lado de outro PE), está é, na prática, uma descrição de limites mais adequada à realização de levantamento de campo.

$$PP_{nx2} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \dots & \dots \\ x_{n-1} & y_{n-1} \\ x_n & y_n \end{bmatrix} \quad (353)$$



SCL - Sistema de Coordenadas Local

PP - Polígono Principal (definição dos limites planimétricos do levantamento)

RE - Retângulo Envolvente ⇒ MCVL - Matriz de Controle e Visualização do Levantamento

◦ CGC - Centro Geométrico da Célula (elementos da MCVL)

FIGURA 3.36 – EXEMPLO DE LIMITES DA ÁREA,  
POLÍGONO PRINCIPAL E RETÂNGULO ENVOLVENTE  
FONTE: Autor (2012)

A matriz com as coordenadas dos vértices que descrevem o PP permite determinar um *Retângulo Envolvente* (RE) que, no SCL, envolve toda a área a ser levantada. RE pode ser completamente descrito pela seguinte matriz 4x2, cujas

linhas representam, pela ordem, as coordenadas  $x$  e  $y$  dos cantos SW, NW, NE e SE no SCL.

$$RE = \begin{bmatrix} x_{\min} & y_{\min} \\ x_{\min} & y_{\max} \\ x_{\max} & y_{\max} \\ x_{\max} & y_{\min} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

### 3.7.3 Medida da célula de referência e matriz de controle e visualização

A *Medida da Célula de Referência* (MCR) é um parâmetro auxiliar expresso em metros que tem por função definir a densidade linear média do levantamento a ser efetuado (em amostras por unidade de comprimento). A princípio, nos levantamentos de teste, seu valor é definido em 1 metro, o que implica em células de 1m x 1m no interior das quais deverá haver coleta de informações durante o processo de levantamento. A figura 3.36 também ilustra o RE e a MCR.

A quantidade de pontos a ser amostrada é, a princípio, diretamente proporcional à área a ser levantada e inversamente proporcional ao quadrado do parâmetro MCR, que está relacionado à precisão intencionada. A atribuição de valores comparativamente menores para MCR aumenta a densidade do levantamento e melhora a precisão, mas torna o levantamento mais lento. O tamanho do VLTC também deve ser considerado na especificação de um valor mínimo para a MCR: 40 cm é uma medida compatível com as principais dimensões características do veículo (D e LE).

A *Matriz de Controle e Visualização do Levantamento* (MCVL) está relacionada com o retângulo envolvente e com a medida da célula de referência. Cada elemento da MCVL está diretamente associado a uma célula no terreno e descreve o seu *status* momentâneo durante o levantamento. A princípio, o VLTC deve coletar as coordenadas de um ponto próximo ao centro da célula. Se durante o deslocamento através da célula o VLTC detectar uma variação significativa na inclinação do terreno, deverá ser feita a coleta das coordenadas de um ponto adicional na correspondente posição.



Por questões de ordem prática<sup>35</sup>, convém que nos levantamentos de teste (a) as coordenadas dos vértices do polígono principal sejam números pares inteiros e (b) que a medida da célula de referência seja definida como 2m, 1m ou 0,5m. Nestas condições o número de linhas e o número de colunas (que são necessariamente valores inteiros) estão associados a células quadradas e de medidas planimétricas notáveis e o mesmo pode ser afirmado com relação às coordenadas centrais de cada célula (no exemplo da figura 3.36 as duas condições supracitadas são atendidas). Doravante a expressão *Centro Geométrico da Célula* (CGC) será adotada para descrever tanto este conceito quanto os valores das respectivas coordenadas planimétricas.

Para o caso mais genérico de um polígono principal ou de uma medida da célula de referência com valores não necessariamente inteiros, o número de linhas e de colunas da MVCL é dado por:

$$\begin{cases} n_{lin} = \text{ceil} \frac{y_{\max} - y_{\min}}{MCR} \\ n_{lin} = \text{ceil} \frac{x_{\max} - x_{\min}}{MCR} \end{cases} \quad (3.55)$$

onde *ceil* (mnemônico de *ceiling* / teto no ambiente Matlab) representa a função de arredondamento para o número inteiro imediatamente acima. Nestas condições as células assumem um formato retangular com base e altura menores ou iguais ao parâmetro de referência MCR.

Em qualquer caso as coordenadas  $x$  e  $y$  dos CGCs associados a cada elemento da MCVL podem ser descritos por duas matrizes  $X$  e  $Y$  cujos elementos são calculados por:

---

<sup>35</sup> Basicamente a facilidade em acompanhar um levantamento de testes.

$$\begin{cases}
 X = [x_{ij}] \\
 Y = [y_{ij}] \\
 i = 1, 2, 3, \dots, n_{lin} \\
 j = 1, 2, 3, \dots, n_{col} \\
 x_j = x_{min} + (2j - 1) \frac{x_{max} - x_{min}}{2n_{col}} \\
 y_i = y_{max} - (2i - 1) \frac{y_{max} - y_{min}}{2n_{lin}}
 \end{cases} \quad (3.56)$$

e estão ilustrados na figura 3.37, que também ilustra a relação entre os elementos da MCVL e as correspondentes células no SCL.

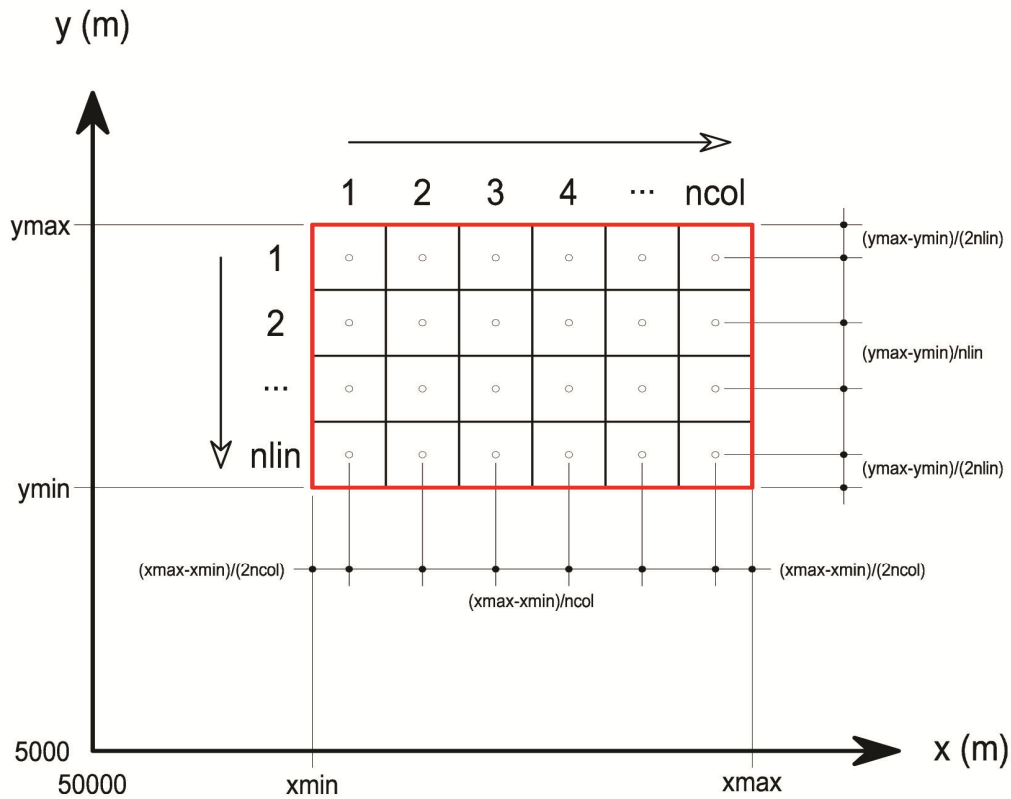


FIGURA – 3.37 RELAÇÃO ENTRE O SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL, O RETÂNGULO ENVOLVENTE E A MATRIZ DE CONTROLE E VISUALIZAÇÃO DO LEVANTAMENTO  
FONTE: Autor (2012)

Convém observar que, uma vez definido RE e MCR, o valor de  $x$  de cada CGC depende apenas do indexador da coluna ( $j$ ) e cresce linearmente em função

deste. Já o valor de  $y$  depende apenas do indexador da linha ( $i$ ) e decresce linearmente em função do mesmo. Isto acontece porque (a) tanto a indexação das colunas quanto a orientação do *eixo x* crescem no mesmo sentido, da esquerda para a direita enquanto que (b) a indexação das linhas cresce de cima para baixo, em sentido contrário ao da orientação do *eixo y*.

### 3.7.4 Condição inicial da MCVL e indicadores de *status*

A condição inicial da matriz MCVL é determinada pela relação entre o centro geométrico de cada célula e o polígono principal:

- Se o CGC estiver no interior do PP ou sobre o mesmo o indicador de *status* da célula assume o valor 1;
- Se o CGC estiver fora do PP, o indicador de *status* assume o valor 0.

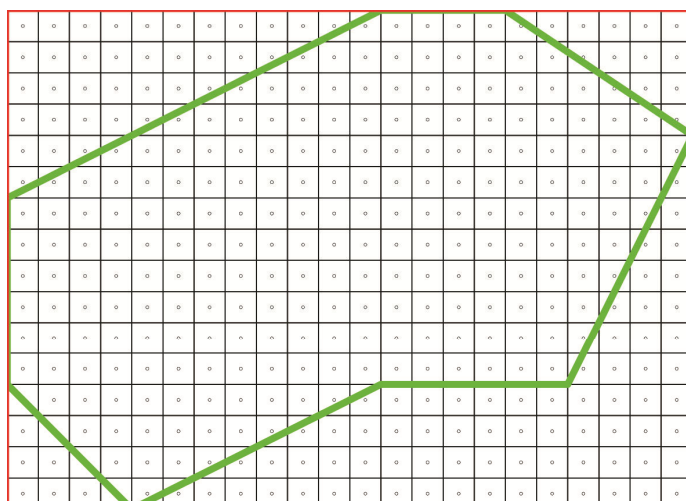
Este teste é feito com a função *inpolygon* do Matlab, que é uma implementação robusta do algoritmo ponto em polígono<sup>36</sup>. A figura 3.38 mostra o valor inicial da MCVL resultante para o PP da figura 3.36.

Posteriormente, à medida que o VLTC efetua a varredura no terreno e passa pelas células, o indicador de *status* de cada uma delas pode assumir um dos indicadores de *status* mostrados no quadro 3.9, que são suficientes para o propósito deste trabalho e para descrever os resultados dos testes realizados<sup>37</sup>.

---

<sup>36</sup> A função *inpolygon* considera pontos sobre o polígono como pertencentes ao seu interior. Sendo necessário fazer esta distinção, o Matlab também oferece a função *onpolygon*. No caso de polígonos complexos, as duas funções consideram inclusive os efeitos dos entrelaçamentos e dos eventuais contatos entre lados e vértices.

<sup>37</sup> Outros indicadores de *status* podem ser acrescentados se a plataforma vier a incorporar recursos adicionais – por exemplo, sensores de distância por ultra-som que, até certo ponto, poderiam detectar obstáculos intransponíveis.



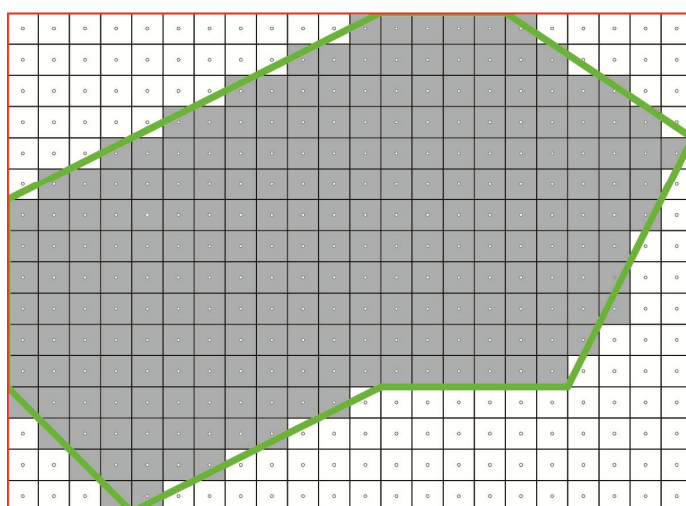
(A) Polígono Principal (PP)  
e Retângulo Envolvente (RE).

```

000000000000011111100000
0000000000001111111110000
0000000001111111111111100
0000001111111111111111110
0001111111111111111111111
0111111111111111111111111
1111111111111111111111111
1111111111111111111111110
1111111111111111111111100
1111111111111111111111100
1111111111111111111111100
1111111111111111111111000
1111111111111111111111000
1111111111111111111110000
1111111111111111111110000
1111111111111111111110000
0111111111111111111110000
0011111111111111111110000
0001100000000000000000000

```

(B) Resultado do  
da função *inpolygon*  
para cada  
Centro Geométrico  
da Célula (CGC).



(C) Células  
consideradas  
com o centro no interior  
do Polígono Principal  
ou sobre ele.

FIGURA 3.38 – RESULTADO DA FUNÇÃO *INPOYGN* APLICADA AOS CENTROS GEOMÉTRICOS DAS CÉLULAS DO RETÂNGULO ENVOLVENTE E AO POLÍGONO PRINCIPAL  
FONTE: Autor (2012)

Valor	<i>Status</i>
0	CGC fora do polígono principal
1	CGC dentro do polígono principal e fora das áreas de exclusão
2	CGC dentro de áreas de exclusão
3	Célula com amostragem normal
4	Célula com amostragem adicional

QUADRO 3.9 – INDICADORES DE STATUS DA MCVL  
FONTE: Autor (2012)

### 3.7.5 Estratégia de movimentação do VLTC

De modo geral, durante a execução do levantamento o sistema controla os movimentos do VLTC para que ele faça uma varredura na área de teste com base na condição inicial da MCVL. Nas células onde o *status* for 1, o sistema procura posicionar o VLTC no CGC e coletar o correspondente conjunto de coordenadas, alterando em seguida o *status* para 3.

O processo é dinâmico e procura varrer seqüencialmente no terreno todas as células de uma coluna da MCVL gerando correções sistemáticas no movimento do veículo. Cada correção é feita com base na trajetória recente (monitorada através do conjunto ETR-prisma) e no próximo CGC – que, no caso, se encaixa literalmente na expressão *waypoint*, posto que representa um ponto num caminho a ser percorrido. Concluída a varredura de uma coluna, o VLTC é reposicionado na extremidade mais próxima da coluna seguinte e passa a varrê-la em sentido inverso ao da coluna anterior.

Simultaneamente à varredura das células a levantar, as informações do inclinômetro vão sendo monitoradas para detectar a eventual necessidade de coletar pontos adicionais. Na ocorrência deste tipo de evento, o *status* da célula deve ser alterado para 4, o que indica haver nela pelo menos um ponto coletado além do ponto próximo ao CGC.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 MEDIDAS DO VLTC

Os principais parâmetros geométricos do VLTC desenvolvido são:

$D = 0,378m$	Distância entre eixos;
$LE = 0,543m$	Largura dos eixos principais
$LR = 0,009m$	Raio de giro efetivo do conjunto das rodas
$R = 0,0683m$	Raio efetivo das rodas tratoras

O comprimento da circunferência da banda de rodagem dos pneus das rodas tratoras, medido com trena de fita, indicava um valor de 0,455m e um raio correspondente de 0,0724m. Na prática o valor efetivo é um pouco menor porque o peso próprio do veículo acarreta um achatamento dos pneus junto ao solo. A medida do raio efetivo foi determinada experimentalmente programando-se a mensagem de comando para um valor de 20.000 (vinte mil) pulsos na funções FRENTE e RE (o que equivale a 10 giros completos das rodas tratoras)<sup>38</sup> e medindo-se a correspondente distância percorrida em linha reta num piso plano horizontal. A redução em relação ao valor medido com trena foi de:

$$\frac{429 - 455}{455} \cdot 100\% = -5,71\%$$

O raio correspondente é:

$$R = \frac{0,429}{2\pi} = 0,0683m$$

---

<sup>38</sup> Convém recordar que o *driver* usado para controle do motor de passo pode operar com micropassos, o que permite alterar as características nominais do motor. Isto posto, deve-se configurar o conjunto *driver*/motor para operar com 400 passos por volta. Como a caixa de redução embutida no motor é de 5X, o resultado final, no eixo de saída da caixa de redução, é um conjunto operando com 2000 passos por revolução do eixo.

O valor de R influencia diretamente o desempenho das funções de movimento em linha reta (FRENTE e RÉ, seção / seção 3.2.8) e também influencia as funções de giro em torno do próprio eixo (GIROE e GIROD/ seções 3.2.13 e 3.2.14), já que o ângulo efetivo de giro depende de uma combinação do raio de giro das rodas tratoras com outros fatores.

Ensaio práticos realizados no LAIG mostraram que para ângulos de giro dos servomotores de até  $\pm 20^\circ$  a relação com os correspondentes ângulos de giro das rodas se mantinha razoavelmente linear e para amplitudes maiores se deteriorava acentuadamente. Por este motivo adotou-se o valor limite de  $20^\circ$  para o parâmetro  $\theta$  (ângulo de giro das rodas) nas funções DLD e DLE e para o parâmetro intermediário  $\theta_{int}$  nas funções CD e CE (o parâmetro principal destas funções é  $rg_v$ ), uma vez que nos movimentos em curva as rodas internas esterçam mais do que as externas. Com isto o raio de giro mínimo foi assumido como:

$$rg_{VMIN} = 0,791m$$

Do ponto de vista da ETR, o VLTC pode ser considerado um alvo móvel. O parâmetro altura do alvo medido com o veículo parado e na horizontal resultou em:

$$H = 0,293m$$

## 4.2 LEVANTAMENTO REALIZADOS

Duas áreas distintas foram empregadas nos levantamentos de testes realizados com o VLTC:

1. Área interna do Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG);
2. Seqüência de três planos na área de circulação entre os bloco V e VI no Centro Politécnico da UFPR.

#### 4.2.1 Levantamentos realizado no LAIG

Os levantamentos efetuados no interior do LAIG foram realizados num ambiente plano e horizontal (exceto por pequenas irregularidades no piso de tacos) com o propósito de testar o sistema de levantamento semi-autônomo como um todo e também a qualidade do posicionamento obtido pelo VLTC no deslocamento entre células adjacentes da MCVL.

A área de teste (figura 4.1) foi marcada no piso do laboratório e o sistema de coordenadas localmente estabelecido baseou-se em suas direções principais. O polígono principal enquadrou 8x8 conjuntos de tacos e resultou num quadrado de 1,683m x 1,683m ao qual se acrescentou um chanfro para exclusão proposital de uma célula. O valor inicial escolhido para MCR (0,500m) foi redefinido automaticamente pelo programa como 0,42075m para gerar uma MCVL de 4 linhas e 4 colunas igualmente espaçadas. O extrato transcrito na página seguinte mostra o valor inicial da MCVL (onde se nota a exclusão da célula no canto chanfrado) e a seqüência de varredura previstas para o VLTC durante o processo de levantamento semi-autônomo.

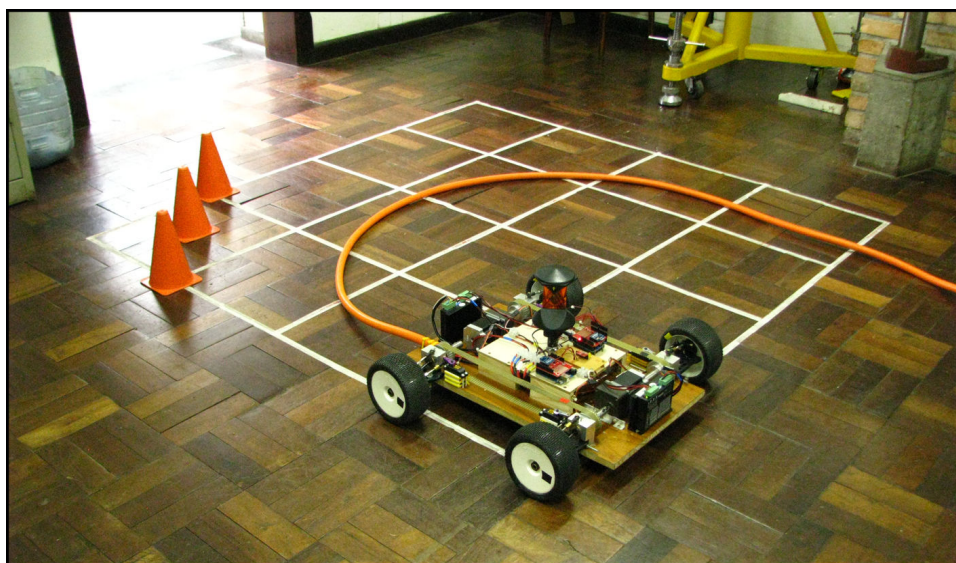


FIGURA 4.1 – ÁREA DE TESTES NO INTERIOR DO LAIG  
FONTE: Autor (2013)



## EXTRATOS DO PROGRAMA E DO PROCESSAMENTO NO MATLAB

```

limext = ...
    [ 5500.000  550.000
      5500.000  551.052
      5500.631  551.683
      5501.683  551.683
      5501.683  550.000 ];

MCR = 0.500;

Resultado do ALGORITMO PONTO EM POLIGONO -> Valor inicial de MCVL

Indica se cada CENTRO GEOMETRICO DE CELULA do RETANGULO ENVOLVENTE
esta (1) ou nao (0) no interior do POLIGONO PRINCIPAL.

MCVL =

    0     1     1     1
    1     1     1     1
    1     1     1     1
    1     1     1     1

ordem_de_varredura_prevista =

    0     4    11    12
    3     5    10    13
    2     6     9    14
    1     7     8    15

```

Os quadros 4.1 a 4.3 mostram coordenadas obtidas nos eixos X, Y e Z para os dois levantamentos semi-autônomos realizados no interior do laboratório.

No caso das coordenadas X e Y as diferenças entre elas e as coordenadas X e Y do centro geométrico da célula (CGC) a ser ocupada constituem indicativos da qualidade do posicionamento planimétrico obtido pelo VLTC sob comando da UCP. Os quadros também apresentam as estatísticas das diferenças.

No caso do eixo Z considerou-se o piso do ambiente como plano e com uma cota de referência 55,000m.

O quadro 4.4 apresenta as diferenças planimétricas e altimétricas entre os dois levantamentos, o que fornece indicativos da repetibilidade do sistema.

**LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMOS  
REALIZADOS NO LAIG / Análise das diferenças**

**COORDENADA X**

(Todos valores em metros)

**Valores da coordenada CGC**

5.500,210	5.500,631	5.501,052	5.501,473
5.500,210	5.500,631	5.501,052	5.501,473
5.500,210	5.500,631	5.501,052	5.501,473
5.500,210	5.500,631	5.501,052	5.501,473

**Levantamento 1**

	5.500,632	5.501,050	5.501,469
5.500,203	5.500,625	5.501,040	5.501,456
5.500,225	5.500,617	5.501,045	5.501,467
5.500,186	5.500,630	5.501,041	5.501,477

**Diferença entre Levantamento 1 e o CGC**

	0,001	-0,002	-0,004
-0,007	-0,006	-0,012	-0,016
0,014	-0,014	-0,007	-0,006
-0,025	-0,001	-0,011	0,004

**Diferença simples**

Média	<b>-0,0069</b>
Desvio padrão	<b>0,0089</b>

**Diferença em módulo**

Média	<b>0,0091</b>
Desvio padrão	<b>0,0064</b>

**Valor RMS da diferença**

**0,011**

**Levantamento 2**

	5.500,604	5.501,066	5.501,467
5.500,216	5.500,611	5.501,033	5.501,455
5.500,219	5.500,623	5.501,040	5.501,464
5.500,164	5.500,636	5.501,040	5.501,472

**Diferença entre Levantamento 2 e o CGC**

	-0,028	0,014	-0,006
0,006	-0,021	-0,019	-0,018
0,009	-0,009	-0,012	-0,009
-0,047	0,005	-0,012	-0,001

**Diferença simples**

Média	<b>-0,0115</b>
Desvio padrão	<b>0,0142</b>

**Diferença em módulo**

Média	<b>0,0111</b>
Desvio padrão	<b>0,0000</b>

**Valor RMS da diferença**

**0,023**

QUADRO 4.1 – LEVANTAMENTOS REALIZADOS NO LAIG / (COORDENADA X)  
FONTE: Autor (2013)

**LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMOS  
REALIZADOS NO LAIG / Análise das diferenças**

**COORDENADA Y**

(Todos valores em metros)

**Valores da coordenada CGC**

551,473	551,473	551,473	551,473
551,052	551,052	551,052	551,052
550,631	550,631	550,631	550,631
550,210	550,210	550,210	550,210

**Levantamento 1**

	551,463	551,474	551,465
551,040	551,063	551,047	551,059
550,629	550,636	550,620	550,634
550,205	550,208	550,229	550,209

**Diferença entre Levantamento 1 e o CGC**

	-0,010	0,002	-0,007
-0,012	0,011	-0,005	0,007
-0,002	0,005	-0,011	0,003
-0,006	-0,003	0,018	-0,001

**Diferença simples**

Média	0,0001
Desvio padrão	0,0082

**Diferença em módulo**

Média	0,0070
Desvio padrão	0,0046

**Valor RMS da diferença**

0,008
-------

**Levantamento 2**

	551,491	551,475	551,470
551,045	551,062	551,037	551,060
550,632	550,636	550,630	550,636
550,214	550,209	550,221	550,213

**Diferença entre Levantamento 2 e o CGC**

	0,019	0,002	-0,002
-0,007	0,010	-0,014	0,008
0,001	0,005	-0,001	0,004
0,003	-0,001	0,010	0,002

**Diferença simples**

Média	0,0025
Desvio padrão	0,0065

**Diferença em módulo**

Média	0,0052
Desvio padrão	0,0000

**Valor RMS da diferença**

0,010
-------

**LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMOS  
REALIZADOS NO LAIG / Análise das diferenças**

**COORDENADA Z**

(Todos valores em metros)

**Valores da coordenada Z de referência**

55,000	55,000	55,000	55,000
55,000	55,000	55,000	55,000
55,000	55,000	55,000	55,000
55,000	55,000	55,000	55,000

Levantamento 1			
	55,002	55,003	54,998
55,004	55,000	55,002	54,998
55,004	55,000	55,002	54,998
55,003	55,000	54,999	54,997

Diferença entre Levantamento 1 e Zref			
	0,002	0,003	-0,002
0,004	0,000	0,002	-0,002
0,004	0,000	0,002	-0,002
0,003	0,000	-0,001	-0,003

Diferença simples	
Média	0,0005
Desvio padrão	0,0022

Diferença em módulo	
Média	0,0019
Desvio padrão	0,0011

<b>Valor RMS da diferença</b>	<b>0,002</b>
-------------------------------	--------------

Levantamento 2			
	55,002	55,002	54,997
55,005	55,000	54,998	54,998
55,004	55,000	55,002	54,998
55,004	54,999	54,999	54,997

Diferença entre Levantamento 2 e Zref			
	0,002	0,002	-0,003
0,005	0,000	-0,002	-0,002
0,004	0,000	0,002	-0,002
0,004	-0,001	-0,001	-0,003

Diferença simples	
Média	0,0000
Desvio padrão	0,0022

Diferença em módulo	
Média	0,0013
Desvio padrão	0,0000

<b>Valor RMS da diferença</b>	<b>0,003</b>
-------------------------------	--------------

QUADRO 4.3 – LEVANTAMENTOS REALIZADOS NO LAIG / (COORDENADA Z)  
FONTE: Autor (2013)

**LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMOS  
REALIZADOS NO LAIG / Análise das diferenças**

**DIFERENÇA PLANIMÉTRICA ( X e Y )**

(Todos valores em metros)

Diferenças entre Lev 1 e Lev 2 no eixo X			
	0,029	-0,016	0,002
-0,013	0,015	0,007	0,001
0,006	-0,005	0,004	0,003
0,022	-0,006	0,001	0,005

Diferenças entre Lev 1 e Lev 2 no eixo Y			
	-0,029	0,000	-0,005
-0,005	0,001	0,009	-0,001
-0,003	0,000	-0,010	-0,002
-0,009	-0,002	0,008	-0,004

Diferença planimétrica total (em módulo)			
	0,040	0,016	0,005
0,014	0,015	0,012	0,002
0,007	0,005	0,011	0,003
0,024	0,006	0,008	0,006

Diferença planimétrica total	
Média	0,0112
Desvio padrão	0,0095

<b>Valor RMS da diferença</b>	0,014
-------------------------------	-------

**LEVANTAMENTOS SEMI-AUTÔNOMOS  
REALIZADOS NO LAIG / Análise das diferenças**

**DIFERENÇA ALTIMÉTRICA ( Z )**

(Todos valores em metros)

Levantamento 1			
	55,002	55,003	54,998
55,004	55,000	55,002	54,998
55,004	55,000	55,002	54,998
55,003	55,000	54,999	54,997

Levantamento 2			
	55,002	55,002	54,997
55,005	55,000	54,998	54,998
55,004	55,000	55,002	54,998
55,004	54,999	54,999	54,997

Diferença entre os Levantamento 1 e 2			
	-0,001	0,000	0,000
-0,001	0,000	0,004	0,000
-0,001	0,000	0,000	0,000
-0,001	0,000	0,000	0,000

Diferença simples	
Média	0,0003
Desvio padrão	0,0012

Diferença em módulo	
Média	0,0008
Desvio padrão	0,0010

<b>Valor RMS da diferença</b>	0,001
-------------------------------	-------

QUADRO 4.4 – COMPARAÇÃO ENTRE OS LEVANTAMENTOS REALIZADOS NO LAIG  
FONTE: Autor (2013)

#### 4.2.2 Levantamentos realizado na rampa entre os blocos V e VI

O segundo levantamento de testes foi realizado em uma seqüência de três planos na área de circulação (corredor de passagem) entre os blocos V e VI no Centro Politécnico da UFPR (figura 4.2).



FIGURA 4.2 – ÁREA DE TESTES NA RAMPA INTERNA ENTRE OS BLOCOS V E VI  
FONTE: Autor (2013)

O sistema de coordenadas adotou o eixo Y no sentido do corredor interno. Essencialmente a área a ser levantada ( 2,0 x 8,5m ) envolve dois planos horizontais unidos por um plano inclinado, onde se situa a maior parte da área a ser levantada.

Os limites da área a ser levantada e o parâmetro MCR foram definidos no programa de controle como:

```
limext = ...
[ 5500.000 550.000
  5500.000 558.500
  5502.000 558.500
  5502.000 550.000 ]; % QUADRILATERO NA RAMPA DO BLOCO 6

MCR = 0.500;
```

Os resultados iniciais do programa de controle do levantamento na janela *Command Window* do Matlab são apresentados nos extratos 1, 2 e 3.

## EXTRATO 1

POLIGONO PRINCIPAL - Limites planimetricos do levantamento

PP =

1.0e+003 \*

5.500000000000000	0.550000000000000
5.500000000000000	0.558500000000000
5.502000000000000	0.558500000000000
5.502000000000000	0.550000000000000

RETANGULO ENVOLVENTE - Enquadra o PP no SCL

RE =

1.0e+003 \*

5.500000000000000	0.550000000000000
5.500000000000000	0.558500000000000
5.502000000000000	0.558500000000000
5.502000000000000	0.550000000000000

Tamanho do Retângulo Envolvente RE - x y (em metros):

2.000000000000000	8.500000000000000
-------------------	-------------------

MCR Medida da Celula de Referencia (em metros):

0.500000000000000

MCVL Matriz de Controle e Visualizacao do Levantamento (em linhas x colunas):

17      4

Tamanho da Celula de Refencia no mundo real - x y (em metros):

0.500000000000000	0.500000000000000
-------------------	-------------------

MCVL Matriz de Controle e Visualizacao do Levantamento (em linhas x colunas):

17      4

## EXTRATO 2

Valores de x no CGC das células / varia de coluna para coluna):

1.0e+003 \*

5.5002500000000000

5.5007500000000000

5.5012500000000000

5.5017500000000000

Valores de y no CGC das células / varia de linha para linha):

1.0e+002 \*

5.5825000000000000

5.5775000000000000

5.5725000000000000

5.5675000000000000

5.5625000000000000

5.5575000000000000

5.5525000000000000

5.5475000000000000

5.5425000000000000

5.5375000000000000

5.5325000000000000

5.5275000000000000

5.5225000000000000

5.5175000000000000

5.5125000000000000

5.5075000000000000

5.5025000000000000

Resultado do ALGORITMO PONTO EM POLIGONO -> Valor inicial de MCVL

Indica se cada CENTRO GEOMETRICO DE CELULA do RETANGULO ENVOLVENTE esta (1) ou nao (0) no interior do POLIGONO PRINCIPAL.

MCVL =

[illegible]



### EXTRATO 3

MCVL Matriz de Controle e Visualizacao do Levantamento

Numero de celulas a ocupar durante o levantamento

68

ordem\_de\_varredura\_prevista =

17	18	51	52
16	19	50	53
15	20	49	54
14	21	48	55
13	22	47	56
12	23	46	57
11	24	45	58
10	25	44	59
9	26	43	60
8	27	42	61
7	28	41	62
6	29	40	63
5	30	39	64
4	31	38	65
3	32	37	66
2	33	36	67
1	34	35	68

Os quadros 4.5 e 4.6 apresentam as coordenadas X e, Y medidas pelo sistema e sua comparação com o valores correspondentes em cada centro geométrico das células a ocupar.

O quadro 4.7 foca na análise estatística da diferença planimétrica entre a posição ocupada pelo VLTC e o CGC – que, numa hipótetica situação ideal, seriam coincidentes. O valor RMS das diferenças no posicionamento planimétrico é, simultaneamente, um indicador da qualidade do posicionamento do VLTC e da eficácia do sistema em realizar o levantamento de forma semi-autônoma.

O quadro 4.8 dá um tratamento mais específico a este levantamento considerando que a inclinação da rampa no miolo da área desce na direção positiva do eixo Y e que na direção do eixo X o piso teria cota (coordenada Z) constante.



Coordenadas obtidas no levantamento			
558,250	558,238	558,249	558,240
557,750	557,757	557,750	557,747
557,240	557,248	557,239	557,252
556,737	556,760	556,737	556,763
556,242	556,265	556,245	556,266
555,752	555,763	555,750	555,764
555,250	555,256	555,250	555,256
554,751	554,755	554,752	554,755
554,249	554,252	554,248	554,252
553,750	553,758	553,749	553,759
553,250	553,256	553,250	553,262
552,745	552,753	552,747	552,750
552,259	552,261	552,259	552,257
551,780	551,745	551,776	551,743
551,246	551,225	551,246	551,235
550,740	550,762	550,736	550,752
550,255	550,249	550,266	550,270

Coordenada do Centro Geométrico da Célula			
558,250	558,250	558,250	558,250
557,750	557,750	557,750	557,750
557,250	557,250	557,250	557,250
556,750	556,750	556,750	556,750
556,250	556,250	556,250	556,250
555,750	555,750	555,750	555,750
555,250	555,250	555,250	555,250
554,750	554,750	554,750	554,750
554,250	554,250	554,250	554,250
553,750	553,750	553,750	553,750
553,250	553,250	553,250	553,250
552,750	552,750	552,750	552,750
552,250	552,250	552,250	552,250
551,750	551,750	551,750	551,750
551,250	551,250	551,250	551,250
550,750	550,750	550,750	550,750
550,250	550,250	550,250	550,250

Diferença entre o levantamento e o CGC			
0,000	-0,012	-0,001	-0,010
0,000	0,007	0,000	-0,003
-0,010	-0,002	-0,011	0,002
-0,013	0,010	-0,013	0,013
-0,008	0,015	-0,005	0,016
0,002	0,013	0,000	0,014
0,000	0,006	0,000	0,006
0,001	0,005	0,002	0,005
-0,001	0,002	-0,002	0,002
0,000	0,008	-0,001	0,009
0,000	0,006	0,000	0,012
-0,005	0,003	-0,003	0,000
0,009	0,011	0,009	0,007
0,030	-0,005	0,026	-0,007
-0,004	-0,025	-0,004	-0,015
-0,010	0,012	-0,014	0,002
0,005	-0,001	0,016	0,020

Diferença simples	
Média	<b>0,0018</b>
Desvio-Padrão	<b>0,0096</b>

Diferença em módulo	
Média	<b>0,0073</b>
Desvio-Padrão	<b>0,0066</b>

**Valor RMS das diferenças                      0,0098**

LEVANTAMENTO SEMI-AUTÔNOMO  
NA RAMPA ENTRE OS BLOCOS V E VI

### **COORDENADA Y**

(Todos os valores em metros)

QUADRO 4.6 – LEVANTAMENTO ENTRE OS BLOCOS V E VI (COORDENADA Y)  
FONTE: Autor (2013)

Diferença planimétrica total			
0,003	0,014	0,002	0,015
0,001	0,019	0,003	0,021
0,010	0,007	0,011	0,013
0,013	0,011	0,014	0,013
0,008	0,015	0,007	0,016
0,003	0,013	0,001	0,014
0,003	0,007	0,002	0,008
0,002	0,005	0,002	0,005
0,002	0,003	0,003	0,005
0,003	0,010	0,006	0,009
0,004	0,006	0,001	0,020
0,005	0,003	0,004	0,027
0,009	0,011	0,010	0,008
0,030	0,007	0,026	0,008
0,006	0,025	0,012	0,015
0,014	0,012	0,026	0,003
0,019	0,003	0,022	0,021

Diferença planimétrica em X			
-0,003	-0,008	0,000	-0,011
0,001	-0,017	-0,003	-0,020
0,000	-0,007	-0,001	-0,013
0,001	0,004	0,002	0,002
-0,002	0,002	-0,004	0,005
-0,001	0,000	-0,001	-0,002
-0,003	-0,003	0,002	-0,005
-0,001	0,000	0,001	0,002
-0,001	0,001	-0,002	0,004
-0,003	0,006	-0,006	0,002
-0,004	-0,001	-0,001	-0,016
-0,001	0,000	0,003	0,027
0,000	0,002	0,003	0,002
-0,001	0,004	0,002	-0,004
0,005	0,001	-0,011	-0,003
0,010	-0,003	-0,022	0,002
0,019	-0,003	-0,014	0,006

Diferença planimétrica em Y			
0,000	-0,012	-0,001	-0,010
0,000	0,007	0,000	-0,003
-0,010	-0,002	-0,011	0,002
-0,013	0,010	-0,013	0,013
-0,008	0,015	-0,005	0,016
0,002	0,013	0,000	0,014
0,000	0,006	0,000	0,006
0,001	0,005	0,002	0,005
-0,001	0,002	-0,002	0,002
0,000	0,008	-0,001	0,009
0,000	0,006	0,000	0,012
-0,005	0,003	-0,003	0,000
0,009	0,011	0,009	0,007
0,030	-0,005	0,026	-0,007
-0,004	-0,025	-0,004	-0,015
-0,010	0,012	-0,014	0,002
0,005	-0,001	0,016	0,020

Diferença planimétrica total	
Média	<b>0,0099</b>
Desvio Padrão	<b>0,0073</b>

<b>Valor RMS das diferenças</b>	<b>0,0123</b>
---------------------------------	---------------

<p>LEVANTAMENTO SEMI-AUTÔNOMO NA RAMPA ENTRE OS BLOCOS V E VI</p> <p><b>DIFERENÇA PLANIMÉTRICA</b></p> <p>(Todos os valores em metros)</p>
--

QUADRO 4.7 – LEVANTAMENTO ENTRE OS BLOCOS V E VI (DIFERENÇA PLANIMÉTRICA)  
FONTE: Autor (2013)

Desnível entre pontos (m) (ao longo do eixo Y)				Inclinação entre pontos (ao longo do eixo Y)				Média
-0,008	0,003	0,001	0,005	-1,58%	0,65%	0,25%	0,97%	0,07%
0,013	0,002	0,003	0,005	2,60%	0,43%	0,61%	0,91%	1,14%
-0,003	-0,003	-0,003	-0,003	-0,60%	-0,51%	-0,52%	-0,65%	-0,57%
-0,020	-0,020	-0,022	-0,021	-4,07%	-4,00%	-4,39%	-4,19%	-4,16%
-0,037	-0,038	-0,039	-0,039	-7,63%	-7,61%	-7,91%	-7,84%	-7,75%
-0,042	-0,043	-0,042	-0,044	-8,36%	-8,42%	-8,31%	-8,57%	-8,42%
-0,039	-0,040	-0,040	-0,039	-7,83%	-7,89%	-7,93%	-7,76%	-7,85%
-0,038	-0,038	-0,038	-0,037	-7,65%	-7,54%	-7,47%	-7,27%	-7,48%
-0,037	-0,038	-0,038	-0,038	-7,44%	-7,64%	-7,58%	-7,75%	-7,60%
-0,038	-0,039	-0,039	-0,042	-7,59%	-7,82%	-7,80%	-8,39%	-7,90%
-0,038	-0,038	-0,040	-0,040	-7,51%	-7,55%	-7,99%	-7,88%	-7,73%
-0,040	-0,040	-0,040	-0,041	-8,24%	-8,11%	-8,30%	-8,33%	-8,25%
-0,039	-0,041	-0,036	-0,034	-8,21%	-7,89%	-7,46%	-6,62%	-7,54%
-0,008	-0,006	-0,005	-0,005	-1,41%	-1,08%	-1,00%	-1,05%	-1,14%
0,005	0,005	0,005	0,004	1,01%	1,08%	1,05%	0,78%	0,98%
0,005	0,001	0,003	0,004	1,13%	0,28%	0,65%	0,78%	0,71%

Distância planimétrica entre os pontos (m)			
0,500	0,482	0,499	0,493
0,510	0,508	0,511	0,495
0,503	0,488	0,502	0,489
0,494	0,495	0,492	0,498
0,490	0,502	0,495	0,501
0,502	0,507	0,500	0,508
0,499	0,501	0,499	0,501
0,502	0,503	0,504	0,503
0,499	0,494	0,499	0,494
0,500	0,503	0,499	0,497
0,505	0,503	0,504	0,513
0,486	0,491	0,487	0,494
0,479	0,517	0,483	0,514
0,533	0,519	0,530	0,508
0,506	0,464	0,510	0,483
0,485	0,513	0,470	0,483

Média	Desvio padrão
0,499m	0,012m

QUADRO 4.8 – LEVANTAMENTO ENTRE OS BLOCOS V E VI (INCLINAÇÃO)  
FONTE: Autor (2013)

As linhas do lado esquerdo do quadro 4.8 representam a diferença de cota (Z) entre as linhas adjacentes da MCVL e o lado direito a correspondente inclinação expressa em porcentagem. Isto permite distinguir o trecho da rampa principal e o fato de que ela desce (inclinação negativa) na direção positiva do eixo Y. A linha correspondente à inclinação média de -4,16% reflete a situação em que um eixo do VLTC ainda se encontrava sobre a rampa principal enquanto que o outro já havia atingido o plano horizontal no fim da rampa. Na extrema direita do quadro 4.8 estão destacadas as médias das inclinações medidas ao longo da rampa principal.

O quadro 4.9 reforça a consideração de que, nesta área de testes, a variação da cota é mínima ao longo da direção do eixo X e acontece apenas em função das pequenas imperfeições do piso e do processo de medição.

Coordenada Z (m)				Variação ao longo eixo X (m)
54,649	54,644	54,646	54,645	0,006
54,657	54,640	54,645	54,640	0,017
54,644	54,638	54,642	54,636	0,008
54,647	54,641	54,645	54,639	0,008
54,667	54,661	54,666	54,660	0,007
54,704	54,699	54,705	54,699	0,006
54,746	54,742	54,747	54,743	0,005
54,785	54,781	54,786	54,782	0,005
54,824	54,819	54,824	54,818	0,006
54,861	54,857	54,862	54,857	0,005
54,899	54,896	54,901	54,898	0,005
54,937	54,934	54,941	54,939	0,007
54,977	54,974	54,981	54,980	0,008
55,016	55,015	55,017	55,014	0,004
55,024	55,020	55,023	55,019	0,005
55,019	55,015	55,017	55,015	0,004

QUADRO 4.9 – LEVANTAMENTO ENTRE OS BLOCOS V E VI  
(VARIAÇÃO DE Z AO LONGO DO EIXO X EM CADA LINHA)  
FONTE: Autor (2013)

#### 4.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS

O presente trabalho procurou integrar instrumentação geodésica (ETR) com diversos sistemas eletrônicos, mecânicos, de automação e de processamento e comunicação de dados para que fosse possível realizar levantamentos semi-autônomos com uma estação total robotizada e um veículo terrestre não tripulado – na verdade, um robô móvel – desenvolvido especialmente para esta tarefa.

Resolvidas as dificuldades de aquisição dos insumos necessários e da elaboração e construção de alguns componentes mecânicos desenvolvidos especialmente para este trabalho, as soluções foram sendo integradas e todas as soluções descritas neste trabalho funcionaram a contento quando trabalhando de forma isolada ou parcialmente integradas.

A gradual integração dos diversos sub-sistemas revelou diversos conflitos menores e interferências que foram sendo resolvidas caso a caso. Porém, com a integração total dos sistemas envolvidos o maior problema encontrado foi decorrente da detectada incompatibilidade das bibliotecas usadas para comunicação via XBee e para controle de servomotores de posição no ambiente Arduino, o que inviabilizou o aproveitamento da mensagem de retorno e o aproveitamento das informações oriundas do inclinômetro. A detecção desta incompatibilidade não foi uma tarefa trivial: os *sketches* em C/C++ eram corretamente compilados e carregados no Arduino e, dentro de certas condições, operavam de forma intermitente. A certeza desta interferência exigiu uma minuciosa análise dos códigos-fonte para checar sua sintaxe, escopo de variáveis e estruturação até que fossem eliminadas as possibilidades de erros de programação ou de estratégia. Há fortes indícios de que as bibliotecas usadas compartilhem recursos internos do Arduino na realização de determinadas tarefas necessárias à execução dos comandos solicitados e que isto gere "efeitos colaterais" decorrentes deste compartilhamento.

Não obstante este problema, foi possível manter um elevado grau de autonomia para o sistema e foi possível comandar o VLTC pelo Matlab via XBee e realizar os levantamentos de forma semi-autônoma introduzindo pausas no programa de comando e solicitando a intervenção do usuário em apenas ordenar a continuidade

do processo após o VLTC cessar os movimentos correspondentes ao último procedimento. Em resumo, diminui-se o grau de autonomia, mas foi possível realizar os levantamentos.

O alcance do dispositivo XBee usado revelou-se, na prática, significativamente menor do que a especificação nominal, não chegando a 40 metros em visada RF livre. Isto inviabilizou alguns levantamentos externos pretendidos, mas pode vir a ser resolvido com o uso de dispositivos *XBee series 1 Pro* (ver seção 3.3.3).

Outro fator limitante foi o peso das baterias utilizadas, que sobrecarregaria o VLTC e que, por este motivo, foram transportadas separadamente. Porém isto pode vir a ser resolvido com o uso de baterias de polímero de lítio, embora esta opção requeira um gerenciamento mais acurado do estado de cargas das baterias (que, apesar de seu desempenho destacadamente superior, são notoriamente sensíveis a dano permanente por descarga excessiva).

Problemas como eventuais interrupções na visada entre a ETR e o prisma no VLTC foram resolvidos via programação. Por exemplo, na impossibilidade temporária de realizar uma medição o Matlab lança mão de estruturas de controle de fluxo para simplesmente aguardar até que seja possível a medição (não era objetivo deste trabalho a integração com outros sensores de posição – por exemplo, sensores odométricos).

Outra situação lidava com distâncias muito pequenas eventualmente medidas (por exemplo, menores que 10 cm) – um forte indício de que alguma falha aconteceu no último deslocamento comandado. Neste caso o programa ordenava ao VLTC seguir em frente por uma distância de 20cm em linha reta, monitorava a direção e, através de um algoritmo dedicado, geralmente retomava o fluxo esperado do levantamento em uma ou duas células adiante. Esta abordagem, combinada com a anterior, contribuiu significativamente para a confiabilidade do sistema e para a conclusão das tarefas necessárias a cada levantamento.

Eventuais conflitos de variáveis de comando que pudessem causar dano ao VLTC foram trabalhados através de testes de intervalos de validade e de confronto



de variáveis em diversas instâncias da programação, tanto no ambiente Matlab quanto no Arduino. Também foram incorporados aos programas recursos para impedir a execução de seqüências de comandos incompatíveis – por exemplo, a função GIRO seguida da função FRENTE ou RE.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

No que diz respeito ao objetivo geral deste trabalho, considera-se que ele foi satisfatoriamente atingido, uma vez que foi possível "realizar o levantamento topográfico cinemático de uma área previamente delimitada, de forma semi-autônoma, com um sistema desenvolvido especificamente para esta tarefa e composto por uma estação total robotizada, um VTNT, um prisma de reflexão total em 360° e sistemas subsidiários".

O sistema desenvolvido para esta tarefa incluiu (a) o desenvolvimento de um veículo terrestre não tripulado dedicado à tarefa de levantamentos topográficos cinemáticos, (b) o desenvolvimento dos diversos sistemas de controle e de comunicação necessários e (c) a integração de todos estes elementos para a realização de levantamentos topográficos de forma semi-autônoma.

O primeiro objetivo específico, construção de um VTNT, foi atingido. A favor da solução desenvolvida – o VLTC –, dois aspectos devem ser destacados:

1. A geometria funcional do VLTC possui a máxima versatilidade possível num veículo de quatro rodas baseado em componentes automotivos *standard*. As funções DLD, DLE, GIRO, GIROD e GIROE proporcionam um repertório de movimentos extremamente versátil e completamente impossível de ser obtido com veículos de quatro rodas baseados na geometria de Ackermann.
2. O uso combinado de servomotores independentes para a direção e de motores de passo para tração priorizou a capacidade de se obter um posicionamento preciso do veículo, a fim de ocupar posições determinadas antecipadamente. Embora menos eficiente em termos de aproveitamento energético, a exatidão de posicionamento assim obtida pode vir a ser uma condição indispensável em determinadas aplicações.

Quanto ao segundo objetivo específico, também foi atingido. A metodologia desenvolvida e incorporada aos programas e ao sistema como um todo é capaz de realizar levantamentos topográficos de forma semi-autônoma.

O terceiro objetivo específico foi igualmente atingido. Os dois levantamentos de teste relatados neste trabalho possuem indicadores que atestam a qualidade do posicionamento obtido e os resultados mostram a coerência dos resultados com as respectivas áreas de testes.

O quarto e último objetivo específico não foi atingido. Os levantamentos de referência com ETR e com sistema *laser scanner* foram criteriosamente preparados em uma área externa selecionada, mas os levantamentos com o sistema ETR-VLTC não foram realizados devido a uma combinação de tempo atmosférico inadequado, uso das ETRs do LAIG em outras atividades do CPGCG fora da UFPR e do tempo necessário à solução dos problemas e conflitos relatados ao final da seção anterior. Pretende-se, contudo, realizar estes levantamentos num futuro próximo.

As contribuições da tese, relacionadas na seção 1.5, são reais e se aplicam aos trabalhos de pesquisa em Ciências Geodésicas. A mensagem de comando e a mensagem de retorno desenvolvidas são versáteis o suficiente para diversas aplicações. Cabe também citar que a possibilidade de comandar um veículo não-tripulado a partir de funções de alto nível em ambiente Matlab viabiliza aplicações que, de outra forma, não seriam viáveis para o tipo de usuário supracitado.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

- Incentivar o desenvolvimento de aplicações relacionadas ao controle e à coleta de dados com estações totais robotizadas em ambiente *Matlab* com processamento em tempo real. De modo geral, (1) as ETRs são, atualmente, o mais exato e preciso instrumento para levantamentos localmente estabelecidos e fundamentam diversas aplicações que dependem deste tipo de

referência de posição<sup>39</sup>. Além disto, (2) o *Matlab* é um dos programas mais utilizados no ensino e na pesquisa em Ciências Geodésicas, mas são relativamente poucas as aplicações que relacionam estes dois recursos – especialmente as em tempo real.

Posto de outra forma, seria conveniente incentivar a comunidade de Ciências Geodésicas a fazer uso do potencial do *Matlab* não apenas como um programa de cálculo, mas como uma plataforma com amplos recursos de hardware e de interfaceamento com outros programas e dispositivos.

No caso específico de ETRs da *Leica Geosystems* / linha *FlexLine*, o protocolo *GeoCOM ASCII* proporciona uma série de recursos que podem ser trabalhados em ambiente *Matlab* através da (a) criação de um objeto tipo serial, (b) da respectiva escrita de *strings* com os comandos e parâmetros desejados e (c) da leitura das correspondentes *strings* de retorno contendo cabeçalhos padronizados e as informações solicitadas. Os programas desenvolvidos para este trabalho exploram, via *Matlab*, a maioria das tarefas típicas de uma ETR.

O desenvolvimento de uma biblioteca de arquivos M que realize no ambiente *Matlab* a série de comandos listada no *Leica TPS1200 Getting Started Manual* pode proporcionar um ponto de partida para estas possíveis aplicações porque abrange os procedimentos mais usuais com ETRs. Além disto, a disponibilidade do código-fonte destes arquivos – que envolve necessariamente comunicação serial e o tratamento de *strings* – seria um exemplo prático adequado de estratégias para comando de ETRs em ambiente *Matlab* que poderia ser adaptado para outras linguagens de programação em alto nível.

Com relação aos veículos, o relatório de Durrant-Whyte (2001) explicita a impossibilidade prática de criar veículos autônomos genéricos para quaisquer tipos de missões e de terrenos e destaca duas linhas de ação no desenvolvimento de

---

<sup>39</sup> As coordenadas obtidas em levantamentos localmente estabelecidos podem ser transformadas nas suas correspondentes coordenadas num Sistema Geodésico de Referência e vice-versa. Mas, para o contexto deste trabalho, um sistema localmente estabelecido é mais adequado.

veículos terrestres autônomos. Segundo ele, a primeira e mais óbvia é "a adaptação de uma plataforma existente, que aproveita um conhecimento substancial previamente incorporado a um veículo operado por um condutor". A outra linha de ação é o desenvolvimento de um veículo com mecanismos de mobilidade completamente diferentes, capazes de lidar com "tipos específicos de missão e condições específicas de terreno" e que torna o problema tratável. Este trabalho se concentrou na segunda linha de ação e, portanto, as recomendações que seguem consideram este contexto.

- Uso de motores DC e *encoders* rotativos para melhorar o desempenho e a autonomia energética do VLTC

A opção por motores de passo foi feita para maximizar as capacidades preditivas de posicionamento. Mas, comparativamente, os motores DC com torque, rotação e desempenho semelhante são mais leves, possuem melhor rendimento e podem ser adaptados ao arranjo de polias e correia sincronizadora usado na tração de cada um dos lados.

Substituir os conjuntos motor de passo & caixa de redução por conjuntos com motores DC de capacidade semelhante pode deixar o veículo mais leve, melhorar seu desempenho e aliviar os esforços realizados pelos servomotores de direção.

O acréscimo de um *encoder rotativo* ao eixo de cada motor DC (ou de sua caixa de redução) possibilitaria, talvez, manter o mesmo conjunto de funções de alto nível usado neste trabalho, mas as correspondentes ações na UCL precisariam ser remodeladas e convém ter em mente que, em geral, os motores DC não serão capazes de prover a mesma qualidade de posição de uma solução baseada em motores de passo.

- Uso de motorização DC embutida nas rodas

O uso de *hub motors* empregados na motorização de bicicletas, motocicletas e carros de golfe pode ser um bom ponto de partida para um VLTC com maior capacidade de carga e melhor desempenho. Existem *kits* de motorização com controladores internos, baterias e discos de freio perfurados (ver, por exemplo, <http://www.goldenmotor.com>) que poderiam ser adaptados a diferentes modelos de roda e prover uma boa solução mecânica. O disco perfurado também pode servir de base para um *encoder* rotativo a fim de gerar informações para odômetros lineares e diferenciais.

Este tipo de solução é compatível com diversos tipos de suspensão e pode facilitar o uso de outros mecanismos de controle de direção.

- Desenvolver um conjunto de roda com *hub motor* e com controle de direção integrado que possa ser diretamente encaixado na plataforma de um veículo ou adaptado a sistemas de suspensão *standard*.

Implementar esta sugestão não seria, a princípio, uma tarefa trivial e provavelmente exigiria a combinação de soluções *off-the-shelf* com soluções customizadas. A expectativa mais provável é que (a) a tração seja baseada em uma solução *off-the-shelf* com um kit de motorização baseado em um *hub motor* e (b) que a direção e o encaixe cilíndrico vertical demandem uma solução customizada que, simultaneamente, incorpore a solução de tração ao conjunto completo. Seria desejável agregar ao conjunto supracitado algum tipo de suspensão com curso vertical.

Não obstante a quantidade de trabalho envolvida, esta solução para um "conjunto combinado de tração, direção e suspensão" seria algo promissor porque, quando pronto, poderia atuar como uma solução *off-the-shelf* para outros trabalhos.

Um conjunto deste tipo com amplitude de 90° para o sistema de direção ( $\pm 45^\circ$ ) permitiria realizar, com folgas, todas as funções descritas para o VLTC usado

neste trabalho. Com amplitude de  $\pm 90^\circ$  ou  $\pm 180^\circ$  tal sistema passaria a ser omnidirecional e permitiria inclusive recursos adicionais como "andar de lado".

- Uso de microcontroladores em trabalhos de graduação e pós-graduação em Ciências Geodésicas

A(s) plataforma(s) Arduino possuem grande potencial de aplicação em trabalhos de Ciências Geodésicas devido à relativa facilidade (1) de sensoriamento de diversas grandezas físicas, (2) de controle analógico e digital de vários tipos de atuadores e dispositivos externos e (3) à flexibilidade de suas capacidades de comunicação serial com um computador, com outros Arduinos e outros dispositivos providos deste tipo de porta de comunicação.

- Desenvolver um *shield* específico para o Arduino UNO e para o Arduino MEGA contendo um acelerômetro, um giroscópio e um magnetômetro triaxial para aplicações didáticas.

Estes dispositivos são tipicamente ASICs em encapsulamentos de montagem superficial (SMD / *Surface-Mount Device*) que necessitam de equipamento industrial de uso específico para garantir a qualidade das ligações e do seu posicionamento nas placas de circuito impresso. Não obstante este fato, a produção deste *shield* em pequena escala é algo possível e que garante um conjunto *Arduino/Shield/Sensores* com um sistema de coordenadas próprio, bem definido e com qualidade geométrica suficiente para viabilizar experiências práticas com sensores de grande potencial de aplicações em Ciências Geodésicas<sup>40</sup>.

Os acelerômetros, giroscópios e magnetômetros triaxiais são dispositivos MEMS que constituem a base de uma IMU (*Inertial Measurement Unit* / Unidade de

---

<sup>40</sup> Uma montagem SDM de padrão industrial vincula o sistema de coordenadas do dispositivo à geometria do *shield*. O *shield*, pela sua própria concepção de encaixe padronizado, é solidário à geometria do Arduino e, por consequência, à geometria do sistema no qual ele está instalado.

Medição Inercial) e de um AHRS (*Attitude and Heading Reference System* / Sistema de Referência de Atitude e Direção). O uso deste tipo de dispositivo em formatos compatíveis com as plataformas Arduino é outra recomendação digna de registro, já que a determinação de atitude é uma solução mais completa e de grande interesse nas Ciências Geodésicas. Porém, o acesso aos "dados brutos" de aceleração, de giro e magnéticos pode ser mais interessante para determinadas aplicações.

- Uso do Arduíno para aquisição das informações de temperatura e umidade relativa do ar em uma ETR

Em determinadas aplicações a exatidão das medidas efetuadas em um levantamento requer informações de temperatura e de umidade relativa do ar. Tipicamente estas informações são introduzidas em um menu de configuração de uma ETR que, com base nos valores informados, gera automaticamente as correções. No caso de medidas feitas para uma série de alvos de forma sistemática, as condições de temperatura e umidade podem variar significativamente, o que gera resultados incorretos caso os novos valores não sejam considerados. Uma placa Arduino UNO associada a um sensor de temperatura e a um sensor de umidade relativa do ar poder ser programada para coletar estas informações de forma sincronizada com a ETR. Obviamente a forma de comunicação de dados e o respectivo processamento dependerão da aplicação em questão, mas um sistema baseado na plataforma Arduino possui recursos e capacidade para tal tarefa.



## REFERÊNCIAS

**AROUND THE CORNER.** Direção de Henry Jamison Handy. Chevrolet Motor Division / General Motors Sales Corporation. 1930, Filme 9min31s, sonoro, preto e branco.  
Disponível em <<http://www.youtube.com/watch?v=K4JhruinbWc>>.  
Acesso em: 06/11/2012.

ATMEL. **ATmega48PA/88PA/168PA/328P.- 8-bit AVR Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash.**  
Datasheet 8161D-AVR-10/09 (449 p.). 2009.  
Disponível em <<http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>>.  
Acesso em 07-04-2013.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR, E. R. **Mecânica vetorial para engenheiros – Dinâmica.** 3. ed. São Paulo: Mc Graw Hill do Brasil, 1980.

BOURKE, P.; VLIET, R. V.; LAM, R. **Determining if a point lies on the interior of a polygon.** Dartmouth College, 1987.  
Disponível em:  
<<http://bbs.dartmouth.edu/~fangq/MATH/download/source/Determining%20if%20a%20point%20lies%20on%20the%20interior%20of%20a%20polygon.htm>>.  
Acesso em: 01/10/2012.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographic information systems for land resources assessment.** New York: Oxford, 1986. 193p.

CÂMARA NETO, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos.** Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo, 1995.  
Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/teses/gilberto/>>.  
Acesso em: 01/10/2010.

CHEVES, M. **Geodimeter – The First Name in EDM.** Professional Surveyor Magazine / March, 1999.  
Disponível em: <<http://www.profsurv.com/magazine/article.aspx?i=394>>.  
Acesso em: 21-04-2013.

CINTRA, J. P. **Contribuições ao estudo e representação de superfícies com o auxílio do computador.** 270p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1985.

CINTRA, J. P. **Automação da topografia: do campo ao projeto.** 120p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

CHUA, C. S. **Testing of Robotic Total Station for Dynamic Tracking**. 105 f. Toowoomba, 2004. Dissertação (Bachelor or Surveying) – Faculty of Engineering and Surveying, Univesity of Southern Queensland.  
Disponível em: < [http://eprints.usq.edu.au/631/1/Garget\\_Dennis-2005.pdf](http://eprints.usq.edu.au/631/1/Garget_Dennis-2005.pdf)>.  
Acesso em: 01/10/2010.

DOLCE, O.; POMPEO, J. N. **Fundamentos de Matemática Elementar. v. 9. Geometria Plana**. São Paulo: Atual, 1985.

DURRANT-WHYTE, H. **A critical review of the state-of-the-art in autonomous land vehicles systems and technology**. Albuquerque, California: SANDIA NATIONAL LABORATORIES, 2001. 41 P. Relatório técnico.  
Disponível em: <<http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2001/013685.pdf>>.  
Acesso em: 01/10/2010.

FREESCALE SEMICONDUCTOR. **MMA7361L:  $\pm 1.5g$ ,  $\pm 6g$  Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer**. Technical data.  
Document Number: MMA7361L. 2008.  
Disponível em:  
<[http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MMA7361L.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361L.pdf)>.  
Acesso em: 12/02/2013.

FRIEDMANN, R. M. P. **Avaliação da qualidade posicional de mapas de orientação produzidos no Brasil**. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

FRIEDMANN, R. M. P. **Fundamentos de Orientação, Cartografia e Navegação Terrestre**. 3. ed. Curitiba: UTFPR, 2009.

GAIOTO, João Roberto Camargo. **Técnica 4x4: Guia de condução fora de estrada**. 2. ed. Curitiba: Edição do autor, 2002.

GOMES, L. E. **Drones: o lado oculto da guerra contra o terror**. Terra, Especiais, 2013, Mundo.  
Disponível em: <<http://www.terra.com.br/noticias/infograficos/drones/>>.  
Acesso em: 23/04/2013.

GRANEMANN, D. C. **Implantação de uma rede geodésica para o monitoramento de estruturas: estudo de caso na Usina Hidrelétrica de Salto Caxias**. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.  
Disponível em: <<http://www.cienciasgeodesicas.ufpr.br/teses/teses02.html>>.  
Acesso: 10/10/2010.

HODZIC, M. **Day in History: Carl Benz and his double-pivot steering**. BenzInsider, 25-fev-2008.  
Disponível em: <<http://www.benzinsider.com/2008/02/day-in-history-carl-benz-and-his-double-pivot-steering/>>.  
Acesso em: 25-abr-2013.

HORGAN, J. **Drones em casa**. National Geographic Brasil, 18-mar-2013.  
Disponível em: <<http://viajeaqui.abril.com.br/materias/drones-aeronaves-sem-piloto-em-casa>>.  
Acesso em: 23/04/2013.

IAG (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY). **Report of the International Association Of Geodesy 2007-2009**. Relatório técnico.  
Disponível em:  
<[http://iag.dgfi.badw.de/fileadmin/IAG-docs/Travaux\\_2007-2009.pdf](http://iag.dgfi.badw.de/fileadmin/IAG-docs/Travaux_2007-2009.pdf)>.  
Acesso em: 15-12-2009.

IAG (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY). **Report of the International Association of Geodesy 2007-2011 – Travaux de l'Association Internationale de Géodésie 2007-2011**. Relatório técnico.  
Disponível em: < [http://www.iagaig.org/attach/d12ad2a68ef6298d1cb03ea913ce3806/Travaux\\_Commission\\_4.pdf](http://www.iagaig.org/attach/d12ad2a68ef6298d1cb03ea913ce3806/Travaux_Commission_4.pdf)>.  
Acesso em: 06-05-2013.

KIM, S.; RUSSEL, J. S.; KOO, K. **Construction robot path-planning for earthwork operations**. Journal of computing in civil engineering. Vol. 17, No. 2, April 2003, pp. 97-104, © ASCE.  
Disponível em: <[http://www.engr.wisc.edu/cee/faculty/russell\\_jeffrey/008.pdf](http://www.engr.wisc.edu/cee/faculty/russell_jeffrey/008.pdf)>  
Acesso em 15/12/2009.

KING-HELE, D. **Erasmus Darwin's improved steering geometry for carriages – and cars**. Notes and Records of the Royal Society. Vol. 56, No. 1, p. 41-62, Jan., 2002.  
Disponível em: <<http://www.jstor.org/discover/10.2307/532121?uid=2134&uid=2&uid=70&uid=4&sid=21101960093293>>.  
Acesso em: 27/04/2013.

LAMBROU, E. PANTAZIS, G. **A new geodetic methodology for the accurate documentation and monitoring of inaccessible surfaces**. 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006.  
Disponível em:  
<[http://www.fig.net/commission6/baden\\_2006/PDF/O3D/Lambrou.pdf](http://www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/O3D/Lambrou.pdf)>  
Acesso em: 15/12/2009.

LATOMBE, J. C. **Robot motion planning**. Norwell: Kluver, 1991.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica TPS1200 GeoCOM Getting Started Manual (Version 1.0 / English)**. 2006a. Manual. 6 f.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica TPS1200 Technical Reference Manual (Version 5.0 / English)**. 2006b. Manual. 1400 f.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica FlexLine GeoCOM Reference Manual (Version 1.30 / English)**. 2008. Manual. 131 f.

LEICA GEOSYSTEMS. **Leica TPS1200+ User Manual (Version 6.0 / English)**. 2008. Manual. 210 f.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: UFPR, 1987.

LI, Z. ZHU, O. GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. Boca Raton: CRC Press. 2004.

LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas micro-eletromecânicos (MEMS)**. 136 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

Disponível em: <<http://www.cienciasgeodesicas.ufpr.br/teses/teses02.html>>.

Acesso em: 01/10/ 2010.

MARTINI, L. **Calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva, em acrílico e sua aplicação no controle de deslocamentos de estruturas**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

Disponível em: <<http://www.cienciasgeodesicas.ufpr.br/teses/teses02.html>>

Acesso em: 01/10/2010.

MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. **The Digital Terrain Model – Theory & Application**. Photogrametric Engineering, v.3, n.24, p.433-442, 1958.

MROZ, ALBERT. **An Illustrated History of Armored Cars, Staff Cars, Motorcycles, Ambulances, Trucks, Tractors and Tanks**. Jefferson: McFarland, 2009.

NEOYAMA. **AK57H/3G5-1.8 Motor de passo c/ cx. redução**.

Joinville, 2012a. *Datasheet*.

Disponível em: <<http://www.neoyama.com.br/movimentacao/ak57h-3g5-1.8.html>>.

Acesso em: 09/04/2013.

NEOYAMA. **Driver para motor de passo AKDMP16–4.2A**.

Joinville, 2012b. *Datasheet*.

Disponível em: <<http://www.neoyama.com.br/comandos/akdmp16-4.2a.html>>.

Acesso em: 09/04/2013.

NEOYAMA. **Motor de passo AK39H/12-1.8**. Joinville, 2012c. *Datasheet*.

Disponível em: < <http://www.neoyama.com.br/movimentacao/ak39h-12-1.8.html> >.

Acesso em: 09/04/2013.

NEOYAMA. **Manual drive para motor de passo modelo AKDMP5-1.7A**.

Joinville, 2012d. *Datasheet*.

Disponível em: < <http://www.neoyama.com.br/comandos/akdmp5-1.7a.html>>.

Acesso em: 09/04/2013.

NEWCOME, L. R. **Unmanned aviation: a brief history of unmanned aerial vehicles**. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). **Airborn geophysics and precise positioning: scientific issues and future directions**. Report of the Committee on Geodesy. Washington DC: National Academic Press, 2002.  
Disponível em: <[http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=4807](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=4807)>.  
Acesso em: 01/10/2010.

NRCAN (NATIONAL RESOURCES CANADA) **100 Years of Geodetic Surveys in Canada**. Modificado em 24-11-2009.  
Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/spatial-referencing/geodetic-timeline/5560>>.  
Acesso em: 21/04/2013.

PALAZZO, D. R. **O uso de uma ETR associada a um sistema geodésico de referência para o monitoramento dinâmico de pontes**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.  
Disponível em: <<http://www.cienciasgeodesicas.ufpr.br/teses/teses02.html>>  
Acesso em: 01/10/2010.

PALAZZO D. et al. **Dynamic monitoring of structures using a robotic total station**. In: FIG XXIII CONGRESS. 2006, Munich, Germany, October, 8-13.  
Disponível em:  
<[http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts78/ts78\\_06\\_palazzo\\_etal\\_0643.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts78/ts78_06_palazzo_etal_0643.pdf)>  
Acesso em: 01/10/2009.

PODER, K. **Introduction**. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC DISTANCE MEASUREMENT AND THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC REFRACTION**. 1978, Wageningen, The Netherlands, 23-28 May 1977.

RAMOS, J. S. B. **Instrumentação eletrônica sem fio. Transmitindo dados com módulos Xbee ZigBee e PIC16F877A**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

RETSCHER, G. **Multi-sensor systems for machine guidance and control**. In: FIG XXII INTERNATIONAL CONGRESS. 2002, Washington D.C. USA, April, 1-26, 2002.  
Disponível em: <[http://www.fig.net/pub/fig\\_2002/Ts6-7/TS6\\_7\\_retscher.pdf](http://www.fig.net/pub/fig_2002/Ts6-7/TS6_7_retscher.pdf)>.  
Acesso em: 01/10/2010.

ROMAMO, V. F. **Robótica industrial: aplicação na indústria de manufatura e de processos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

RÜEGER, J. M. **Electronic distance measurement: an introduction**. 3. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

SERVODATABASE. **Hextronik HXT900 - 9g Micro Servo**. Basic information & additional specifications.

Disponível em: <<http://www.servodatabase.com/servo/hextronik/hxt900>>.

Acesso em: 09/04/2013.

STOCHERO, T. **Polêmicos e revolucionários, mais de 200 'drones' voam no país sem regra**. G1, São Paulo, 25-mar-2013.

Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2013/03/polemicos-e-revolucionarios-mais-de-200-drones-voam-no-brasil-sem-regra.html>>.

Acesso em: 23/04/2013.

STURMAN, B.; WRIGHT, B. **The history of tellurometer**. In: FIG WORKING WEEK, 2008, Stockholm, Sweden, 14-19 June 2008.

Disponível em:

<[http://www.fig.net/pub/fig2008/papers/hs01/hs01\\_03\\_sturman\\_wright\\_2833.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2008/papers/hs01/hs01_03_sturman_wright_2833.pdf)>.

Acesso em: 01/10/2010.

SUNDAY, D. **Intersections of a set of segments**. Geometry Algorithms Home.

Disponível em <[http://geomalgorithms.com/a09-\\_intersect-3.html](http://geomalgorithms.com/a09-_intersect-3.html)>.

Acesso em: 23/04/2013.

UNITED STATES ARMY CORP OF ENGINEERS. **EM 1110-2-1009 Engineering and design – Structural Deformatin Surveyng**. Washiungton D.C: Department of the Army, 2002.

Disponível em: <[http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/EM\\_1110-2-1009\\_sec/toc.htm](http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/EM_1110-2-1009_sec/toc.htm)>.

Acesso em 15-12-2009.

VEIGA, L. A. K. **Topografia Automatizada**. Universidade Federal do Paraná, Curso de Especialização em Geotecnologias, 2006. 60 p.

VEIGA, L. A. K. **Automação topográfica – parte 2 MDT**. Curso de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal do Paraná, 2007. Apostila.

WEIBEL, R.; HELLER, M. Digital terrain modelling . In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHINO, D. W. ed., Geographical Information Systems. s.l.: Longman Scientific & Technical, 1990. p.269-96.

WENNSTROM, H. F. **Erik Bergstrand and the geodimeter**. In: FIG WORKING WEEK, 2008, Stockholm, Sweden, 14-19 June 2008.

Abstract disponível em:

<[http://www.fig.net/pub/fig2008/papers/hs01/hs01\\_02\\_wennestrom\\_2832\\_abs.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2008/papers/hs01/hs01_02_wennestrom_2832_abs.pdf)>.

Acesso em: 01/10/2010.

WOLF, P. R. **Surveying and mapping: history, current status and future projections**. Paginas 163 a 191 do livro Perspectives in Civil Engineering:

Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers. Editado por American Society of Civil Engineers, 2003.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. **Adjustment computations and least squares in surveying and GIS**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

ZOCOLLOTTI FILHO, C. A. **Utilização de técnicas de poligonação de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção: estudo de caso na Usina Hidrelétrica de Salto Caxias**. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.  
Disponível em: <<http://www.cienciasgeodesicas.ufpr.br/teses/teses02.html>>  
Acesso em: 10/10/2010.

## APÊNDICE A – VIABILIDADE DE USO DA ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA LEICA TCRA 1205 R100 EM LEVANTAMENTOS TOPOGRÁFICOS CINEMÁTICOS

Este apêndice detalha o experimento descrito sucintamente na seção 3.6 e que foi realizado com o propósito de testar a viabilidade de emprego da ETR Leica TCRA 1205 R100 em *levantamentos topográficos cinemáticos* e como *sistema de posicionamento* para o VLTC (que, por ocasião deste experimento, encontrava-se em estudos preliminares). Os resultados indicaram a viabilidade do uso da ETR como sistema de posicionamento do VLTC.

### A.1 Descrição do experimento realizado

Neste experimento foram efetuados dois levantamentos simultâneos de uma mesma área com geometria conhecida e bem definida. Nos dois casos são *levantamentos cinemáticos* com coletas de dados a cada um segundo de tempo. Um destes levantamentos foi feito com a ETR Leica TCR 1205 R100, acompanhando automaticamente um prisma 360° Leica GRZ4 transportado por um operador que se desloca continuamente sobre as linhas de interesse e que definem a geometria da área. Este prisma foi posicionado em um suporte especial que permite, na mesma haste (figura 3.34), a montagem solidária da estação móvel de um sistema GNSS RTK L1/L2 GPS & GLONASS marca TOPCON, modelo HYPER LITE<sup>+</sup>, adquirido no segundo semestre de 2009 para uso no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) do PPGCG. Isto permite a coleta de dados simultânea e, portanto, proporciona uma comparação mais efetiva dos resultados dos dois levantamentos topográficos cinemáticos.

A área de testes do experimento foi a pista de atletismo do Centro Politécnico da UFPR (figura 3.35, repetida como A.1 por conveniência de consulta). É uma área plana, de contornos bem definidos e cuja geometria pode ser objetivamente descrita por um conjunto relativamente pequeno de parâmetros geométricos – o que favorece a comparação entre os dois levantamentos topográficos cinemáticos.





FIGURA A.1 – VISÃO GERAL DA ÁREA DE TESTES USADA NO EXPERIMENTO  
 FONTE: Esteio Engenharia e Aerolevantamentos (2008) e Google Earth (2009).

A ETR foi posicionada sobre o pilar P1 e a estação base do sistema GNSS RTK sobre o pilar P2. Os dois pilares são intervisíveis (figura A.2).



FOTOS: FRIEDMANN (2009)



FIGURA A.2 – ETR E ESTAÇÃO BASE RTK POSICIONADAS NOS PILARES  
 FONTE: Autor (2009).

## A.2 Levantamento topográfico cinemático com ETR

A figura A.3 mostra o posicionamento da ETR, a orientação do sistema de coordenadas topográfico (que é definida por P1 e P2) e os pontos coletados.

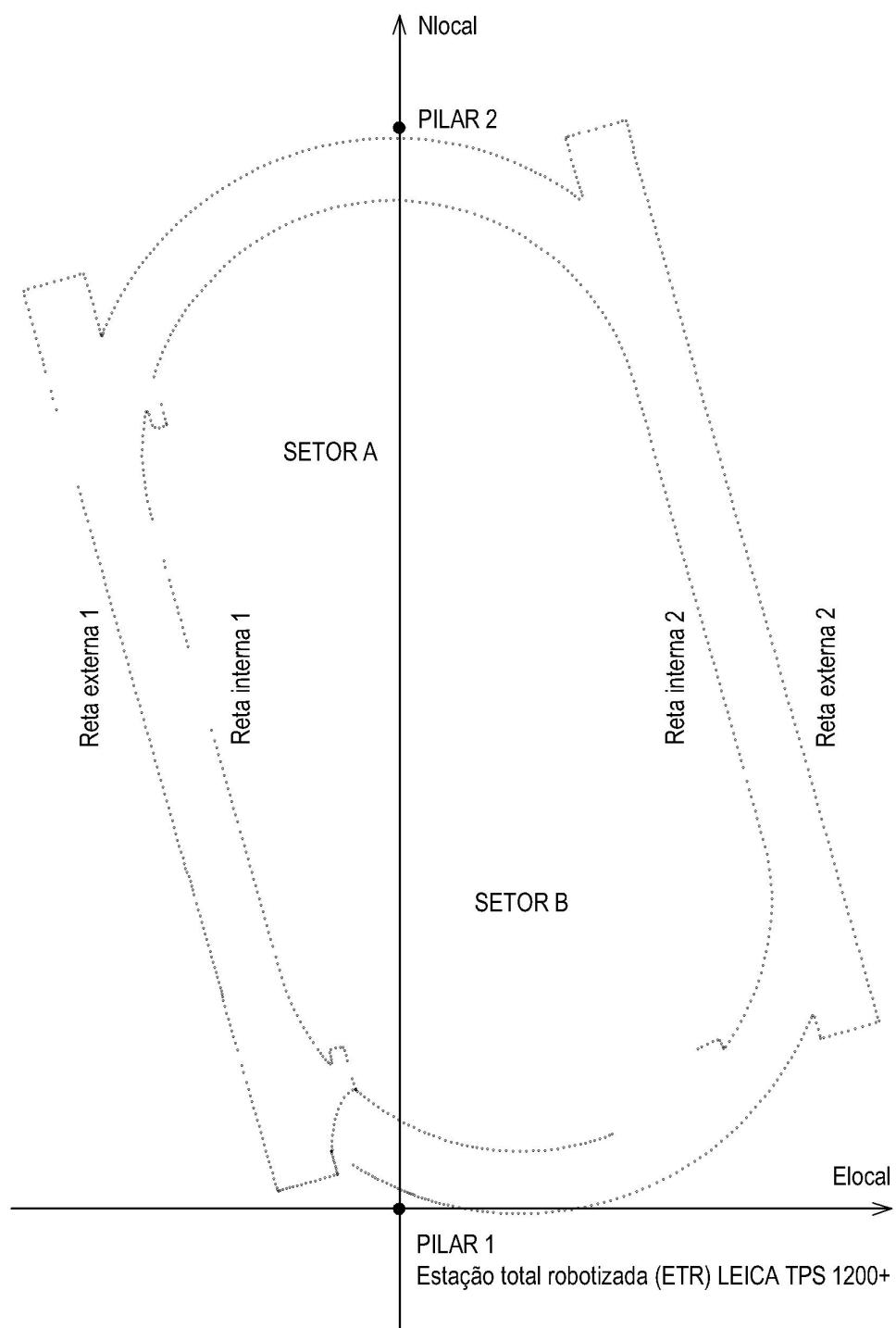


FIGURA A.3 – POSICIONAMENTO DA ETR, PONTOS RASTREADOS,  
ORIENTAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS TOPOGRÁFICAS LOCAL  
E NOMENCLATURA ADOTADA PARA OS SETORES  
FONTE: Autor (2011)

O sistema de coordenadas empregado para o levantamento com a ETR foi localmente estabelecido com as seguintes características:

- fator de escala unitário;
- ETR estacionada sobre o PILAR 1, ao qual foram atribuídas as coordenadas  $E_{\text{local}} = 5.000,000\text{m}$  /  $N_{\text{local}} = 500,000\text{m}$  /  $H_{\text{local}} = 50,000\text{m}$ ;
- Orientação  $0^\circ$  na direção do eixo do PILAR 2.

Na figura A.3 e no quadro A.1 podem ser observados os efeitos decorrentes de algumas interrupções na linha de visada ETR – prisma devido a obstáculos existentes no local. Como estes obstáculos não interferiam com o levantamento RTK e a taxa de amostragem foi a mesma para os dois levantamentos (posição a cada um segundo), a menor quantidade de pontos no levantamento com ETR já seria esperada.

Quantidade de pontos capturados com intervalo de tempo de 1 segundo				
trecho	ETR	RTK	dif	dif %
contorno externo	533	575	42	7%
contorno interno	381	456	75	16%

QUADRO A.1 – QUANTIDADE DE PONTOS COLETADOS  
FONTE: Autor (2011)

Os dados coletados com a estação LEICA TCR 1205 R100 foram descarregados em um dos computadores do LAIG através do software POSIÇÃO 2004 via cabo de dados e interface serial (RS-232). A partir do POSIÇÃO foram processados e exportados em formato DXF para permitir tratamento e manipulação gráfica dos dados usando o programa AutoCAD. Também através do POSIÇÃO foram geradas as cadernetas eletrônicas e feita sua exportação em formato TXT.

### A.3 Levantamento topográfico cinemático com GNSS RTK

Para o levantamento com o sistema GNSS RTK a estação base foi posicionada sobre o PILAR 2 e a estação móvel (*rover station*) no topo do suporte especial que permite posicioná-la sobre o prisma na mesma haste (figura 3.34, seção 3.6). Este suporte foi originalmente desenvolvido para permitir levantamentos ETR e RTK simultâneos para monitorar a movimentação vertical de uma ponte de concreto sob condições de tráfego variadas (PALAZZO, 2005).

A estação base e a estação móvel GNSS empregadas (marca TOPCON, modelo HYPER LITE<sup>+</sup>) processam sinais L1/L2 dos sistemas GPS e GLONASS. Como a área é bastante ampla e desobstruída, as condições para levantamentos GNSS são praticamente ideais.

Os dados foram descarregados e processados em um computador do LAIG usando os programas *TopSURV7* e *Topcon Tools*, a partir do qual foram gerados arquivos DXF e de texto com as informações necessárias à comparação do levantamento via RTK com o levantamento via ETR.

Por facilidade de interpretação dos resultados as coordenadas foram apresentadas na Projeção UTM e no *datum* WGS 84 (figura A.4).

### A.4 Obtenção dos parâmetros descritores da pista

As figuras A.5, A.6, A.7 e A.8 ilustram como foram obtidos os parâmetros descritores da geometria da pista para o levantamento topográfico cinemático efetuado com o conjunto ETR / prisma 360°.

A figura A.9 é um detalhe que mostra graficamente a eficiência destes parâmetros em descrever a pista.

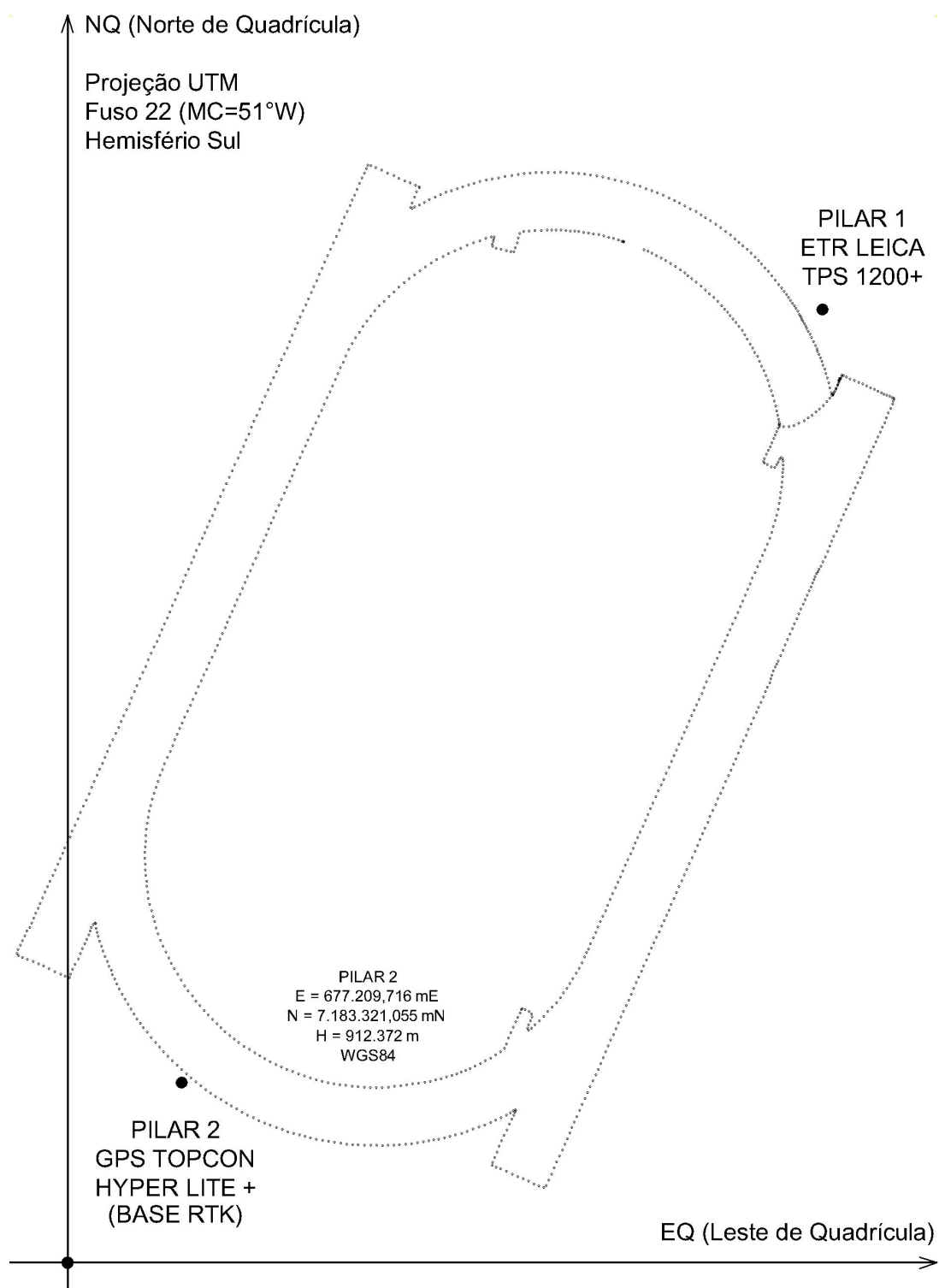


FIGURA A.4 – POSICIONAMENTO DA ESTAÇÃO BASE RTK E,  
ORIENTAÇÃO DOS EIXOS DA PROJEÇÃO UTM  
FONTE: Autor (2011).

No gráfico representativo de todos os pontos levantados pela estação tornam-se evidentes os trechos da pista que, em condições ideais, seriam percorridos em linha reta. Para cada trecho foram selecionados dois pontos próximos às mudanças de direção. De modo geral, evitou-se o ponto imediatamente anterior e o ponto imediatamente posterior a cada mudança porque eles são mais sujeitos a movimentos erráticos.

O filetamento de dois segmentos consecutivos, feito com raio zero, gera os quadriláteros que delimitam as regiões “retas” de uma pista de atletismo, onde são disputadas as corridas de 100 metros rasos (figura A.5). Como estas regiões não são, no caso, retângulos perfeitos, utilizou-se o ponto médio de cada um dos quatro segmentos menores para a obtenção do comprimento médio de cada uma das duas regiões, procedimento ilustrado na figura A.7.

Cada um dos quatro raios de curvatura indicados na figura A.8 foi obtido a partir de uma circunferência definida por três pontos da correspondente curva: um ponto próximo do início, outro próximo do meio e outro do final.

Numa situação idealizada os comprimentos médios dos trechos 1 e 2 seriam iguais. Também seriam iguais os dois raios de curvatura interna e os dois raios de curvatura externa.

A determinação dos parâmetros descritores a partir do levantamento GNSS RTK segue o mesmo procedimento, mas aplicado ao respectivo conjunto de dados.

Os parâmetros obtidos em cada um dos levantamentos estão apresentados e comparados provisoriamente no quadro A.2. Esta comparação deve ser encarada como ilustrativa e preliminar porque existem diferenças conceituais e metodológicas entre os levantamentos que, a bem da exatidão, precisam ser consideradas.

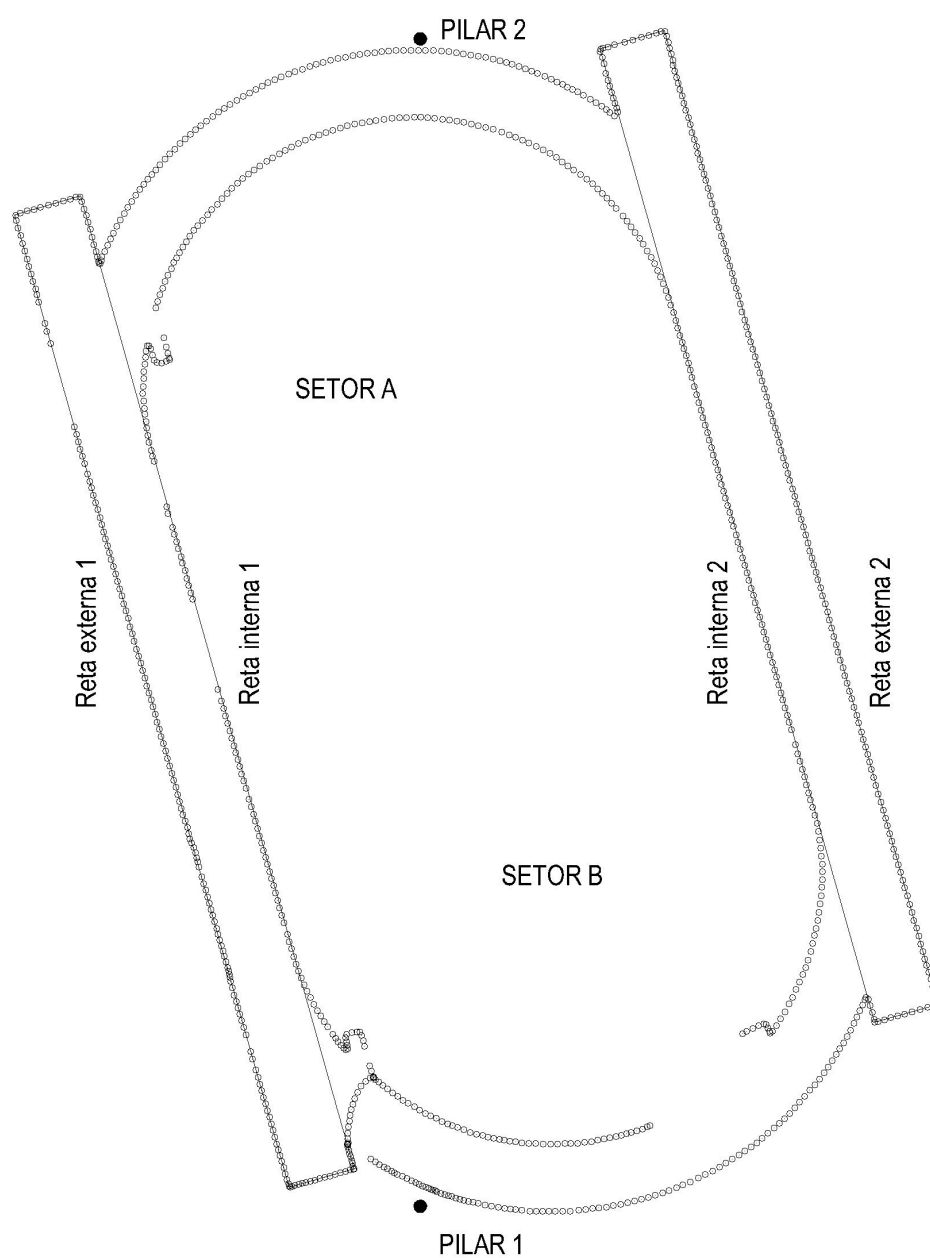


FIGURA A.5 – OBTENÇÃO DOS  
PRINCIPAIS SEGMENTOS DE RETA DO LEVANTAMENTO ETR  
FONTE: Autor (2011)

NOTA: Todos os valores indicados estão expressos em metros.

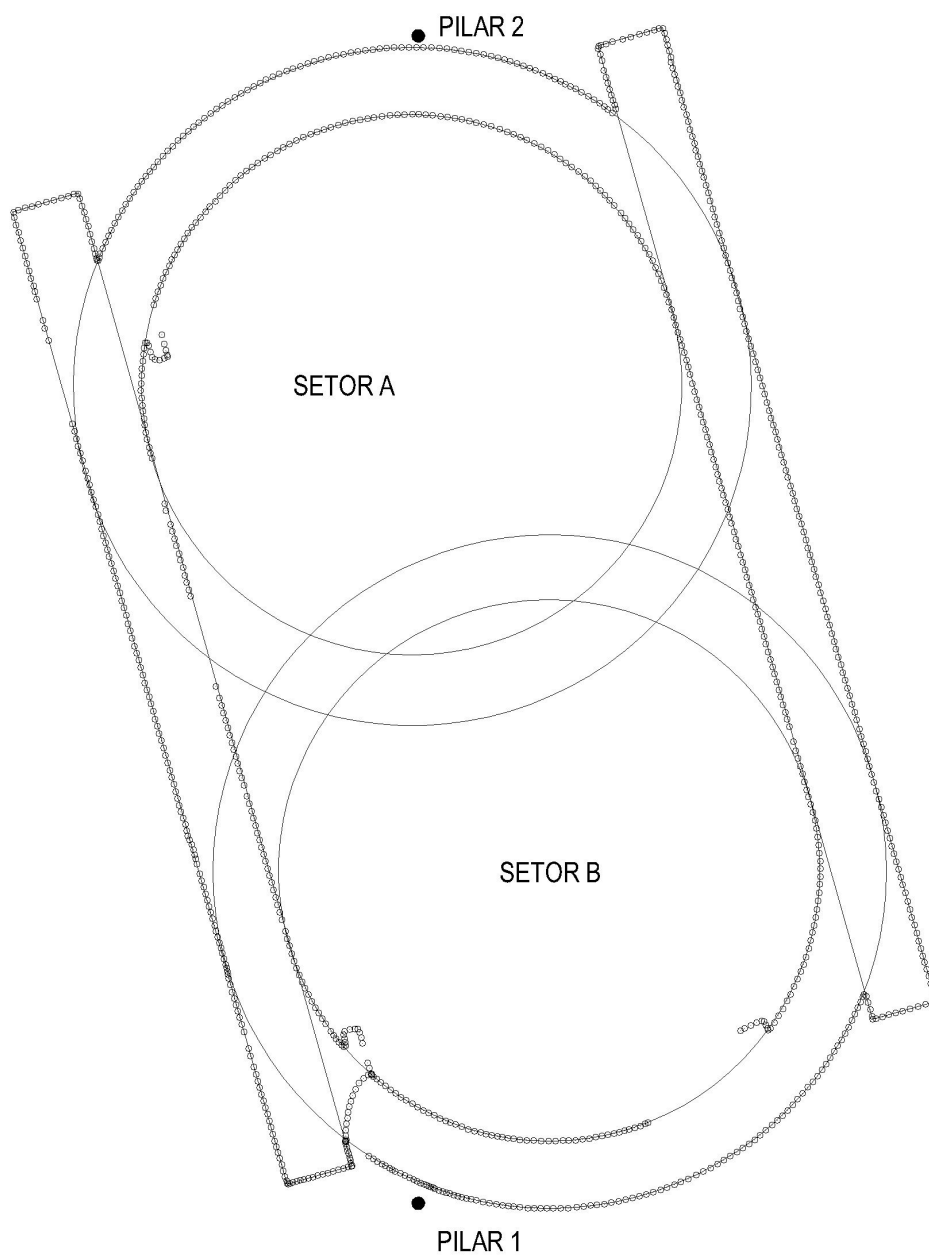


FIGURA A.6 – OBTENÇÃO DAS  
CIRCUNFERÊNCIAS PRINCIPAIS DO LEVANTAMENTO ETR  
FONTE: Autor (2001)

NOTA: Todos os valores indicados estão expressos em metros.



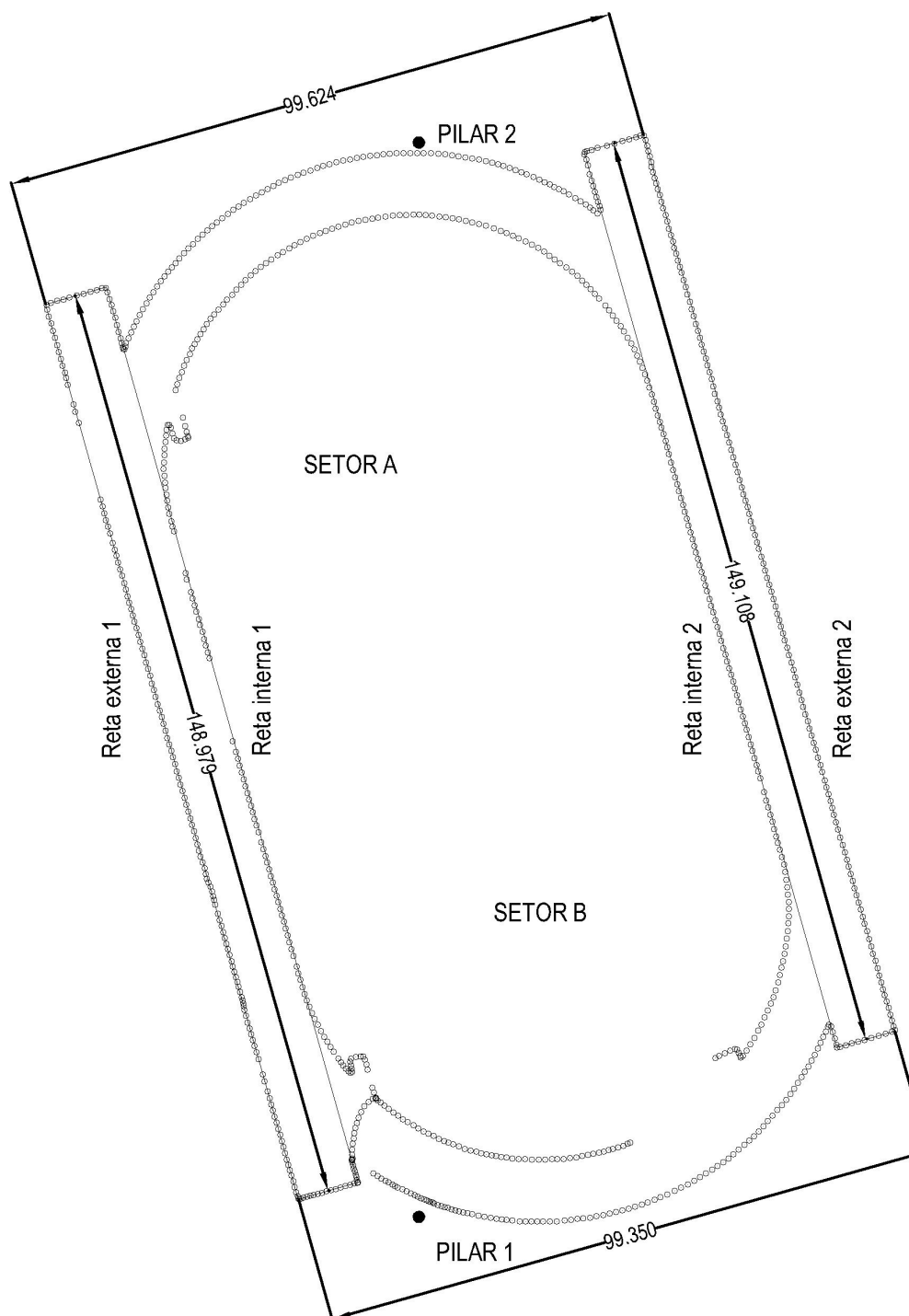


FIGURA A.7 – OBTENÇÃO DOS PRINCIPAIS  
PARÂMETROS DESCRITIVOS DO LEVANTAMENTO ETR (A)  
FONTE: Autor (2011)

NOTA: Todos os valores indicados estão expressos em metros.

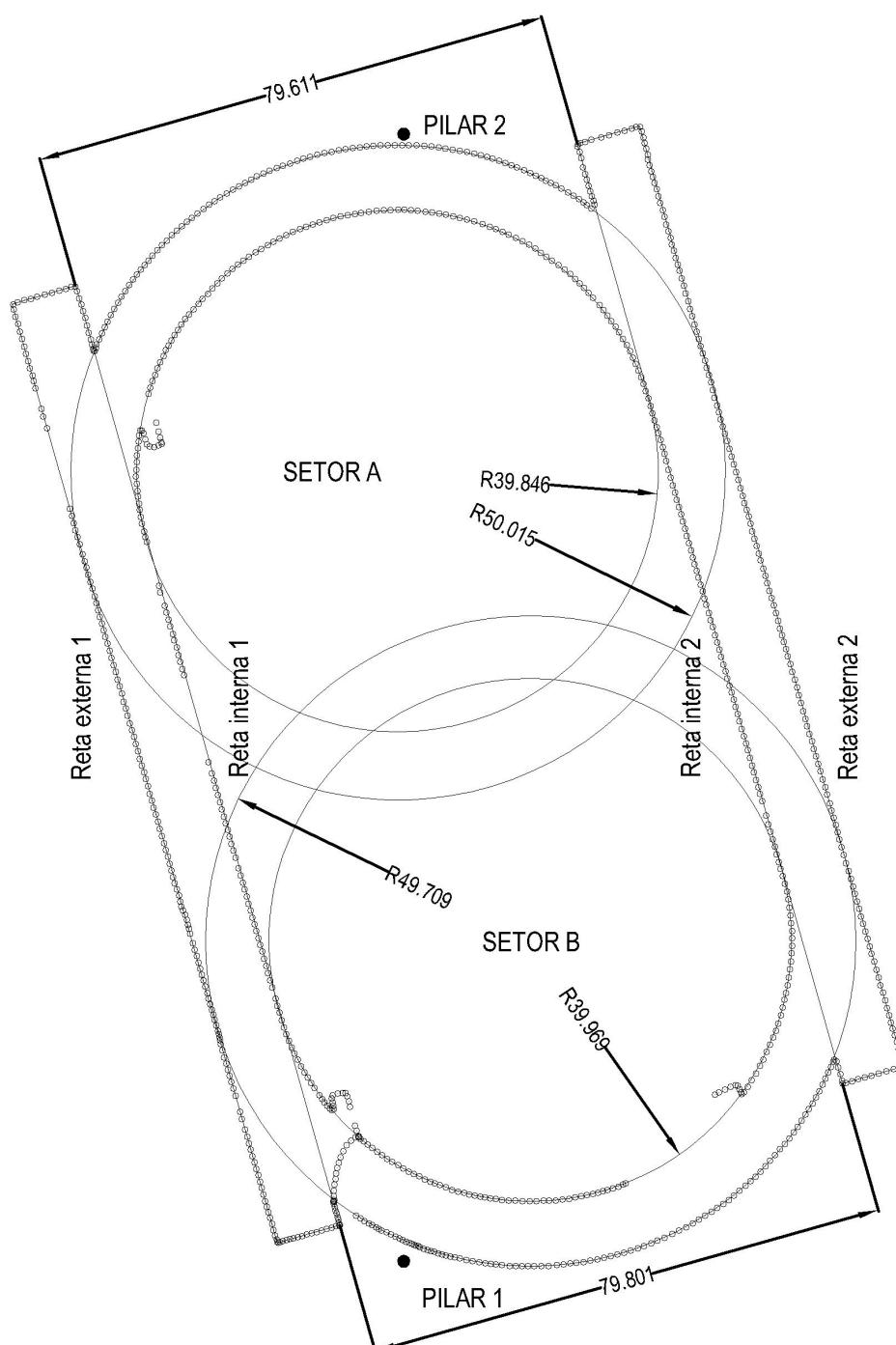


FIGURA A.8 – OBTENÇÃO DOS PRINCIPAIS  
PARÂMETROS DESCRITIVOS DO LEVANTAMENTO ETR (B)  
FONTE: Autor (2011)

NOTA: Todos os valores indicados estão expressos em metros.

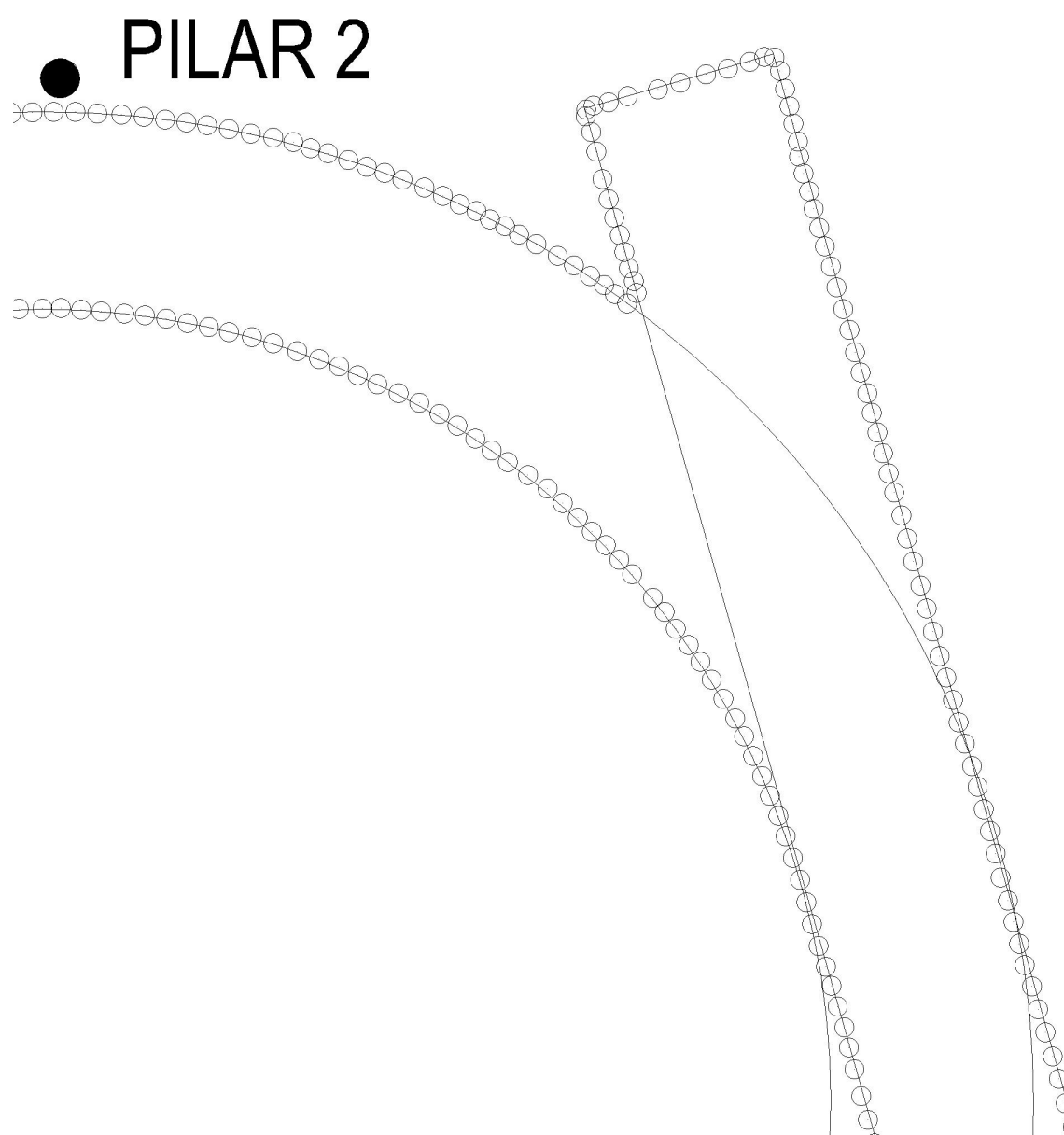


FIGURA A.9 – DETALHE DO LEVANTAMENTO ETR AMPLIADO 3 VEZES  
FONTE: Autor (2011)

Comprimento médio (metros)	ETR	RTK	dif
conjunto de raias 1	148,979	148,993	-0,014
conjunto de raias 2	149,108	149,093	0,015
	-0,129	-0,100	

Distância entre retas (metros)	ETR	RTK	dif
pelas extremidades do lado A	99,350	99,388	-0,038
pelas extremidades do lado B	99,624	99,732	-0,108
	-0,274	-0,344	

Distância entre retas internas (metros)	ETR	RTK	dif
pelas extremidades do lado A	79,611	79,596	0,015
pelas extremidades do lado B	79,801	79,867	-0,066
	-0,190	-0,271	

Raio de curvatura interno (metros)	ETR	RTK	dif
RA interno	39,846	39,912	-0,066
RB interno	39,969	39,959	0,010
	-0,123	-0,047	

Raio de curvatura externo (metros)	ETR	RTK	dif
RA externo	50,015	50,087	-0,072
RB externo	49,710	49,714	-0,004
	0,305	0,373	

QUADRO A.2 – COMPARAÇÃO PRELIMINAR DOS PARÂMETROS DESCRITORES DA PISTA  
OBTIDOS EM CADA LEVANTAMENTO CINEMÁTICO  
FONTE: Autor (2011)

Para comparar efetiva e diretamente os parâmetros obtidos em cada levantamento é necessário aplicar o fator de escala da Projeção UTM (no caso 0,999987804) e, também, o fator de redução devido à altitude, que depende da altitude e do raio da Terra considerado e, no caso (*datum WGS84*), é expresso por

$6378137 / ( 6378137 + 912 ) = 0,999855$ . Isto feito, os parâmetros obtidos via ETR e a comparação (quadro A.3) resultam em:

<b>Comprimento médio (metros)</b>	<b>ETR</b>	<b>RTK</b>	<b>dif</b>
conjunto de raias 1	148,956	148,993	<b>-0,037</b>
conjunto de raias 2	149,085	149,093	<b>-0,008</b>
	-0,129	-0,100	

<b>Distância entre retas (metros)</b>	<b>ETR</b>	<b>RTK</b>	<b>dif</b>
pelas extremidades do lado A	99,335	99,388	<b>-0,053</b>
pelas extremidades do lado B	99,624	99,732	<b>-0,108</b>
	-0,289	-0,344	

<b>Distância entre retas internas (metros)</b>	<b>ETR</b>	<b>RTK</b>	<b>dif</b>
pelas extremidades do lado A	79,599	79,596	<b>0,003</b>
pelas extremidades do lado B	79,789	79,867	<b>-0,078</b>
	-0,190	-0,271	

<b>Raio de curvatura interno (metros)</b>	<b>ETR</b>	<b>RTK</b>	<b>dif</b>
RA interno	39,840	39,912	<b>-0,072</b>
RB interno	39,963	39,959	<b>0,004</b>
	-0,123	-0,047	

<b>Raio de curvatura externo (metros)</b>	<b>ETR</b>	<b>RTK</b>	<b>dif</b>
RA externo	50,007	50,087	<b>-0,080</b>
RB externo	49,702	49,714	<b>-0,012</b>
	0,305	0,373	

QUADRO A.3 – COMPARAÇÃO FINAL DOS PARÂMETROS DESCRITORES DA PISTA  
COM AS REDUÇÕES APLICADAS AO LEVANTAMENTO ETR  
FONTE: Autor (2011)

Numa situação ideal os parâmetros descritores obtidos através do levantamento GNSS RTK e do levantamento com a ETR (já consideradas a redução de

escala da projeção UTM e a redução de altitude) seriam idênticos e as diferenças listadas na última coluna seriam todas nulas.

Isto significaria simplesmente que, nesta situação ideal, os dois levantamentos concordam completamente entre si e que seriam métodos diferentes de se efetuar a coleta e de processar os dados, mas capazes de gerarem o mesmo resultado.

Já as diferenças apresentadas na última linha de cada parte da tabela possuem outro significado. Elas refletem a combinação das irregularidades na geometria da pista com as dificuldades do operador humano em:

- manter a verticalidade da haste à medida em que ele se movimenta;
- acompanhar as muretas demarcatórias da pista – que, no caso, apresenta algumas irregularidades, algumas interrupções e que também são frequentemente ocultas por pequenos tufo de mato;
- evitar tropeções e esbarrões que provocam movimentos bruscos na haste e, por consequência, nos dados capturados.

#### A.5 Comentários sobre as diferenças entre os levantamentos

A média dos módulos das 8 diferenças indicadas para os parâmetros descritores é de 0,0479m, ou seja, cerca de 5cm. A diferença máxima foi inferior a 11cm. A título de esclarecimento, a indicação da incerteza de posição na estação móvel RTK era indicada pelo respectivo coletor em tempo real e os valores típicos estavam usualmente entre 2cm e 3cm.

Sabia-se de antemão que, para os equipamentos empregados, a precisão e a exatidão de posição da ETR, quando empregada para um levantamento estático, são superiores às aquelas que o sistema GNSS ETK empregado poderia proporcionar. Porém ainda não haviam sido realizadas experiências práticas visando quantificar e analisar a qualidade de posição obtida no acompanhamento de um alvo móvel.

#### A.6 Considerações sobre o resultado do experimento

Os resultados obtidos indicaram que, em velocidades semelhantes à de caminhada, a exatidão de posição obtida em um levantamento topográfico cinemático com um conjunto ETR / prisma 360° é, na prática, suficiente para basear um levantamento topográfico cinemático realizado com um veículo terrestre não tripulado transportando um prisma 360° posicionado em seu topo.